

TAMPEREEN YLIOPISTO

**Neljän ei-klassisen mieslaulajan resonanssitaktiikat
voimakkaassa laulussa
Akustinen analyysi ja elektrolottografia**

Kasvatustieteiden yksikkö

Puhetekniikan ja vokologian pro gradu -tutkielma

TERO IKÄVALKO

huhtikuu 2016

Tampereen yliopisto

Kasvatustieteiden yksikkö

TERO IKÄVALKO: Neljän ei-klassisen mieslaulajan resonanssitaktiikat voimakkaassa laulussa

Akustinen analyysi ja elektroglossografia

Puhetekniikan ja vokologian pro gradu -tutkielma, 70 sivua

Huhtikuu 2016

Tutkimuksessa pyrittiin selvittämään miespuolisten ei-klassisten laulajien resonanssitaktiikoita sävelalueella, joka sijoittuu rekisterirajan tuntumaan ja yläpuolelle. Aihetta on aiemmin tutkittu runsaasti klassisilla laulajilla sekä jossain määrin ei-klassisilla naislaulajilla. Koehenkilöinä toimi neljä ei-klassisia musiikintyyliä edustavaa koulutettua mieslaulajaa. Koehenkilöt lauloivat keskivoimakkaasti tai voimakkaasti yhdeksältä sävelkorkeudelta kolmella englanninkielien sanalla *love*, *let* ja *leave*. Äännoista tallennettiin akustinen signaali ja elektroglossografia. Ääninäytteiden spektreistä analysoitiin visuaalisesti kahden matalimman resonanssin taajuudet ja elektroglossografialla tallennetusta signaalista neljä äänihuulikontaktia ja sen muutosta kuvastavaa muuttujaa. Visuaalisessa arvioinnissa hyödynnettiin spektreissä näkyvää hälyä, johon syntyy usein korostuma jonkin ääntöväylän resonanssin kohdalla. Tällä menetelmällä resonanssin taajuus oli useimmiten havaittavissa silloinkin, kun se osui kahden osasävelen väliselle alueelle.

Tulokset olivat pääosin linjassa aiemman tutkimuksen kanssa. Rekisterirajan yläpuolella vokaaleilla [ʌ:] ja [ɛ:] ääntöväylän ensimmäisen resonanssin tulkittiin vahvistavan äänen toista osasäveltä. Vokaalilla [ʌ:] myös toisen resonanssin virittämällä ylempien osasävelten tuntumaan saattaa olla vaikutusta tehokkaimman resonanssitaktiikan saavuttamisessa. Vokaalilla [i:] ensimmäinen resonanssi nousi sävelkorkeuden noustessa vältellen päätymistä samalle taajuudelle ensimmäisen osasävelen kanssa. Spektrien perusteella arvioitiin, että [i:]-vokaalilla voisi olla myös mahdollista laskea kolmatta resonanssia lähemmäksi toisen resonanssin taajuutta ja vahvistaa laajempaa sävelaluetta näiden kahden resonanssin yhteisvaikutuksella. Verrattaessa elektroglossografian avulla laskettuja parametreja ja resonanssien viritystä havaittiin, että koehenkilö, joka viritti resonanssit keskimäärin lähemmäksi osasäveliä, omasi keskimäärin pienemmän äänihuulivärähtelyn kontaktiosamäärän kuin koehenkilö, jolla resonanssit sijaitsivat etäämmällä osasävelistä. Sama oli käänteen nähtävissä resonanssien virituksen ja normalisoidun elektroglossografian ensimmäisen derivaatan maksimiarvon välillä.

Resonanssien viritystä lauluäänentuotossa on hyödyllistä tutkia vielä jatkossakin. Tähän mennessä saadut tulokset ovat auttaneet rakentamaan alustavaa teoriaa. Lisätutkimus voisi tarjota uusia laulupedagogisia apuvälineitä ja auttaa ymmärtämään paremmin tähän mennessä käytettyjen harjoitusmenetelmien toimintaperiaatteita.

Avainsanat: resonanssi, resonanssitaktiikka, formantti, resonanssien viritys, elektroglossografia, laulu

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	4
2	TUTKIMUKSEN TAUSTAA	6
2.1	ÄÄNTÖVÄYLÄ JA RESONANSSIT	6
2.2	VOKAALIEN JA RESONANSSIEN SUHDE	7
2.3	RESONANSSITAKTIIKAT	9
2.3.1	<i>Aiempaa tutkimusta resonanssitaktiikoista</i>	<i>10</i>
2.3.2	<i>Resonanssitaktiikat laulunopetuksessa</i>	<i>14</i>
2.4	RESONANSSITAAJUUDEN MÄÄRITTÄMINEN LAULUSTA	14
2.5	ELEKTROGLOTTOGRAFIA (EGG)	15
2.6	TUTKIMUSTAVOITTEET, -KYSYMYKSET JA HYPOTEESIT	18
2.6.1	<i>Tutkimuskysymykset</i>	<i>18</i>
2.6.2	<i>Hypoteesit</i>	<i>18</i>
3	MENETELMÄT	20
3.1	KOEHENKILÖT	20
3.2	MITTAUKSET JA LAITTEET	21
3.3	ÄÄNTÖTEHTÄVÄT	22
3.4	ANALYYSIT	23
3.5	RESONANSSITAKTIIKOIDEN JA RESONANSSIEN TAAJUUKSIEN ARVIOINTI	24
3.5.1	<i>Osasävelten väliset voimakkuuserot</i>	<i>24</i>
3.5.2	<i>Spektrissä näkyvä häly</i>	<i>25</i>
3.6	RESONANSSIEN VIRITYKSEN JA ÄÄNILÄHTEEN VÄLISEN VUOROVAIKUTUKSEN TUTKIMINEN	27
3.7	AKUSTISEN SIGNAALIN YLIOHJAUTUMISEN VAIKUTUKSEN ARVIOIMINEN	28
4	TULOKSET	30
4.1	RESONANSSIEN ARVIOINTI JA RESONANSSITAKTIIKAT	30
4.1.1	<i>Vokaali [a:] sanasta love</i>	<i>30</i>
4.1.2	<i>Vokaali [e:] sanasta let</i>	<i>35</i>
4.1.3	<i>Vokaali [i:] sanasta leave</i>	<i>37</i>
4.1.4	<i>Ääntötehtävä 4</i>	<i>42</i>
4.2	RESONANSSIEN VIRITYS JA ELEKTROGLOTTOGRAFIA	44
4.2.1	<i>Resonanssien viritys</i>	<i>44</i>
4.2.2	<i>Elektroglottografian tulokset</i>	<i>46</i>
4.2.3	<i>EGG-parametrien ja resonanssien virityksen yhteydet</i>	<i>50</i>
4.3	SIGNAALIN YLIOHJAUTUMISEN VAIKUTUS SPEKTRIIN	54
5	POHDINTA	56
5.1	RESONANSSITAKTIIKAT	56
5.1.1	<i>Vokaali [a:]</i>	<i>56</i>
5.1.2	<i>Vokaali [e:]</i>	<i>58</i>
5.1.3	<i>Vokaali [i:]</i>	<i>60</i>
5.1.4	<i>Muita spektriin vaikuttavia tekijöitä</i>	<i>62</i>
5.2	RESONANSSI JA ÄÄNILÄHDE	63
5.3	TUTKIMUKSEN YLEINEN ARVIOINTI	65
6	JOHTOPÄÄTÖKSET	69

1 JOHDANTO

Laulajat hyödyntävät ääntöväylää monella tavalla laulussa. Väylän resonanssit ovat vastuussa siitä, että vokaalit saavat niille ominaisen tunnistettavan sävynsä. Ääntöväylä voi myös auttaa äänihuulia värähtelemään tehokkaammin. On tehty paljon tutkimusta siitä, mikä on ääntöväylän ja sen resonanssien rooli laulussa. Tähän mennessä suurin osa tutkimuksesta on keskittynyt klassisiin mies- ja naisääniin sekä ei-klassisiin naisääniin. Tutkimus ei ole tarjonnut yksiselitteisiä vastauksia, mikä viittaa siihen, että resonanssin hyödyntämisessä olisi useita tapoja. On esitetty eroavia näkökulmia siitä, onko ääntö tehokkainta silloin, kun jokin äänen osasävelistä on suoraan resonanssin kohdalla vai hieman sen alapuolella. Joissain tapauksissa väylän merkitys äänen vahvistajana voi olla pieni kuten esimerkiksi silloin, kun äänihuulivärähtely synnyttää itsessään rikkaan ja täyteläisen sarjan osasäveliä. Tällöin väylän tärkein tehtävä on tuottaa ääneen eri äänteille ominaiset sävyt.

Tällä tutkimuksella pyrittiin lisäämään vertailukelpoista tietoa vähemmän tutkituista ei-klassisten mieslaulajien mahdollisista keinoista hyödyntää resonanssia. Noninvasiivisia menetelmiä (Elektroglottografia) hyödyntäen pyrittiin myös etsimään viitteitä resonanssin ja äänilähteen välisistä yhteyksistä. Kiinnostuksen kohteena oli sävelväli D4 – A#4, joka sisältää tyypillisesti noin F#4 tienoilla olevan miesäänien rekisterivaihdoskohdan. Korkeilla sävelillä lauletaessa resonanssiin liittyvien säätöjen merkityksen voidaan olettaa korostuvan entisestään sillä perustaajuuden kasvaessa äänen osasävelet siirtyvät etäämmälle toisistaan ja mahdollisuus sille, että väylän tuoma avustus ei osu niiden kohdalle, kasvaa.

Laulajien äänenkäytön tutkiminen on tärkeää, koska laulussa korostuvat usein ääneen vaikuttavien osatekijöiden merkitykset jopa enemmän kuin puheessa. Laulajien on pystyttävä maksimoimaan ääntöelimistön tehohyötysuhde eli tuottamaan runsaasti energiaa pienellä työllä. Heidän on hallittava tavallista paremmin niitä mekanismeja, jotka saavat äänihuulet värähtelemään keuhkoista virtaavan ilman vaikutuksesta. Ymmärtämällä paremmin lauluääntä voidaan kehittää myös puheäänien harjoittamisen menetelmiä.

Tämän tutkimuksen aihealue on merkityksellinen, koska musiikin tyyli- ja laulajien kuten pop, rock, soul ja hevi opettaminen on lisääntynyt ja kasvattanut suosiotaan paljon viimeisen kymmenen vuoden aikana. Lisäksi erilaisia laulumetodeja, jotka opettavat laulamaan korkealta voimakkaasti ja jopa huutavasti, on koko ajan enemmän ja enemmän. On tärkeää saada lisää tietoa siitä, miten

tällaista laulua on mahdollista tuottaa taloudellisesti rasittamatta turhaan äänihuulikudosta. On myös ymmärrettävä paremmin, missä yksilöiden väliset erot tulevat vastaan. Kaikilla ei ole välttämättä mahdollisuutta täyttää erilaisten musiikin tyylilajien vaatimuksia samankaltaisella äänentuottomekanismilla.

2 TUTKIMUKSEN TAUSTAA

2.1 Ääntöväylä ja resonanssit

Karkeasti jaoteltuna ihmisen äänielimistön voidaan katsoa koostuvan kolmesta osatekijästä: hengityselimistöstä, äänihuulista ja ääntöväylästä (Sundberg 1987, 9). Ääntöväyläksi kutsutaan äänihuulten yläpuolista ontelosta, joka koostuu suuontelosta, nenäontelosta, nielusta ja kurkunpään eteisontelosta (Laukkanen & Leino 1999, 61 - 62). Ääntöväylän muoto määrittää sen akustiset ominaisuudet, jotka vastaavat muun muassa eri vokaalisävyjen syntymisestä ääneen (Seikel, King, & Drumright 2009, 265).

Akustiikan näkökulmasta ääntöväylää voidaan kuvata putkistona, joka koostuu eri läpimittaisista ja pituisista perättäisistä osioista. Tällaisessa putkistossa kahden eri läpimittaisen osan rajapinnassa tapahtuu tyypillisesti osittaista äänen heijastumista. Heijastuessaan takaisin tulosuuntaansa ääniaalto muodostaa joillain taajuuksilla putkistoon seisovan aallon. Näitä taajuuksia kutsutaan putkiston resonansseiksi. Ääntöväylällä on teoriassa loputon määrä resonansseja, mutta puheen ja laulun muodostuksessa muutamilla matalimmilla on käytännössä merkitystä. (Titze 2000, 150 - 157.)

Ääntöväylän roolia suusta ulos säteilevän äänen muodostumisessa on kuvattu lineaarisen lähde-suodin teorian (Fant 1970) ja epälineaarisen lähde-suodin teorian (Titze 2008) avulla. Lineaarisen lähde-suodinteorian mukaan äännössä suotimena toimiva ääntöväylä muuttaa äänihuulivärähtelyn synnyttämien osasävelten välisiä suhteita vaikuttamatta itse äänilähteen toimintaan. Tästä seuraa, että äänen osasävelet, jotka ovat samalla tai läheisellä taajuudella jonkin ääntöväylän resonanssin kanssa, säteilevät suusta ulos voimakkaampina kuin ne osasävelet, jotka eivät ole resonanssitaajuuksien läheisyydessä. Suusta ulos säteilevän äänen spektri $P(f)$ saadaan tällöin kertomalla äänilähteen synnyttämä spektri $S(f)$ ääntöväylän eli suotimen ominaisuuksia kuvastavalla funktiolla $T(f)$ (Fant 1970, 15 - 21).

Epälineaarisen lähde-suodinteorian mukaan äänihuulivärähtelyyn ja sen aikaan saamaan glottaaliseen ilmavirtapulssiin vaikuttaa myös ääntöväylän akustinen paine. Epälineaarinen lähde-suodin teoria pyrkii siis huomioimaan myös äänilähteen ja ääntöväylän välisen vuorovaikutuksen. Teorian mukaan äänen osasävelet voivat vahvistua resonanssitaajuuksien alapuolisilla alueilla

ääntöväylän taajuusriippuvaisen reaktanssin vaikutuksesta. Resonanssitaajuuksien kohdalla reaktanssin vaikutus muuttuu äkillisesti epäsuotuisaksi. Varsinkin matalimpien osasävelten osuessa resonanssitaajuuden kohdalle syntyy äänihuulivärähtelyyn epävakaisuutta. Äänilähteen ja ääntöväylän epälineaarisen vuorovaikutuksen määrä on kytköksissä kurkunpään eteisontelon avoimuuteen. Mitä pienempi tämän poikkipinta-ala on, sitä enemmän ääntöväylä vaikuttaa äänilähteen toimintaan. (Titze 2008.)

Sekä lineaarista että epälineaarista lähde-suodin mallia käytetään kuvaamaan ihmisiäänen toimintaa. Titze (2008) sekä Titze ja Worley (2009) kritisoivat lineaarisen lähde-suodin teorian kykyä kuvata ääntä korkeilla sävelillä ja laulussa. Kuitenkin mm. Sundberg, Lã, ja Gill (2011; 2013) tulkitsivat lineaarisen lähde-suodin teorian kuvaavan onnistuneesti laulua. He perustivat tämän johtopäätöksensä siihen, että heidän käänteissuodatukseen perustuvat tuloksensa eivät tarjonneet juurikaan merkkejä lähteen ja suotimen välisestä epälineaarisesta vuorovaikutuksesta.

2.2 Vokaalien ja resonanssien suhde

Eri vokaalisävyt syntyvät äänihuulivärähtelyn tuottamaan ääneen ääntöväylän resonanssien vaikutuksesta. Ääntöväylän resonanssit vahvistavat äänen spektristä eli yläsävelsarjasta kullekin vokaalille ominaisia taajuusalueita. Jos ääntöväylä olisi tasaisen leveyden omaavan putken muotoinen, sen matalimpien resonanssien taajuudet sijoittuisivat noin 1000 Hz:n etäisyydelle toisistaan lähelle taajuuksia 500 Hz, 1500 Hz, ja 2500 Hz ja syntyvä äänne muistuttaisi neutraaliäännettä [ə] (Titze, 2000, 162 - 164).

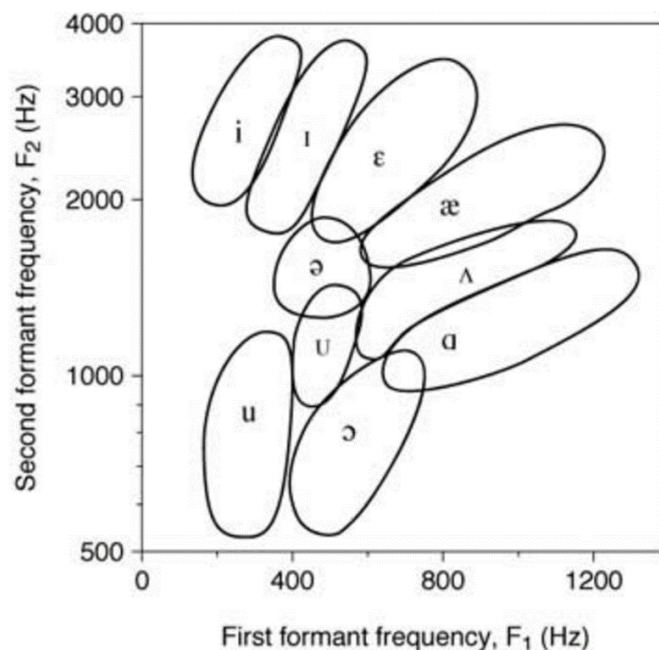
Ääntöväylän muoto riippuu artikulaatioelimistön asennosta. Sitä muuttamalla laulaja tai puhuja voi muuttaa resonanssitaajuuksia sekä syntyvää äännettä. Aikuisella mieshenkilöllä ensimmäisen resonanssin taajuus voi vaihdella suurin piirtein välillä 250 Hz – 700 Hz ja toisen resonanssin taajuus välillä 700 Hz – 2500 Hz (Sundberg, 1977). Ääntöväylän ensimmäinen resonanssi R1 nousee tyypillisesti, kun suuta avataan enemmän, ja ääntöväylän toinen resonanssi R2 on voimakkaasti kytköksissä kielen sijaintiin ja muotoon. Kurkunpään nousu saa aikaan sekä R1:n että R2:n taajuuden kasvun, jonka määrä on riippuvainen vokaalista. (Lindblom & Sundberg, 1971; Stevens & House, 1955)

Koska ääntöväylän muoto ja vokaalisävy ovat riippuvaisia toisistaan, laulaja voi myös pyrkiä muuttamaan väylän resonanssien taajuuksia säätämällä vokaalisävyä. Kuviossa 1 on esitetty kahden matalimman resonanssin tyypilliset taajuusalueet joukolle eri äänteitä. Kuvion data on peräisin Petersonin ja Barney'n (1952) tutkimuksesta. Kuvio itsessään on poimittu kirjasta *Principles of Voice Production* (Titze, 2000), jossa siitä oli saatavilla paranneltu versio. Kyseisestä kuviosta voidaan

arvioida minkä äänteen suuntaan vokaalia on muunnettava, jotta saadaan aikaan haluttu muutos resonanssien taajuuksissa. Jos esimerkiksi suomenkielen vokaalia /a/ ([ɑ]) äännettäessä halutaan kasvattaa toisen resonanssin (R2) taajuutta, voidaan vokaalisävyä muuttaa äänteen [æ] suuntaan.

Taulukossa 1 on vielä suurpiirteisesti miesten kahden matalimman resonanssin taajuudet puheessa vokaaleille [Λ], [ε] ja [i]. Taajuusalueet on arvioitu Petersonin ja Barney'n (1952) tutkimuksen tuloksista. Heidän 76 koehenkilönsä joukossa oli 33 miespuolista henkilöä, jotka olivat kotoisin Yhdysvaltojen eri osista ja puhuivat amerikanenglannin yleiskielistä ääntämismuotoa (General American). Vertailun vuoksi samassa taulukossa on esitetty myös kyseisiä äänteitä lähimpänä olevien suomenkielen vokaalien resonanssitaajuuudet, jotka on poimittu Iivosen ja Laukkasen (1993) tutkimuksesta.

On oletettu, että resonanssitaajuuksien säätäminen olisi erittäin merkityksellistä varsinkin lauletaessa korkeita säveliä (D. G. Miller, 2008). Kun ääntä tuotetaan puhekorkeudelta, äänen osasävelet ovat suhteellisen lähellä toisiaan. Ääntöväylän resonanssit sijoittuvat käytännössä aina yhden tai useamman osasävelen läheisyyteen voimistaen niitä ja samalla äänen spektriä. Siirryttäessä korkeammille sävelillä osasävelten väliset etäisyydet kuitenkin kasvavat. Resonanssit voivat tällöin sijoittua kahden osasävelen väliin ja olla vaikuttamatta juurikaan minkään osasävelen voimakkuuteen. Tällöin tarvitaan jonkin asteisia muutoksia artikulaatioasetuksessa, jotta resonanssien tuoma avustus saataisiin kohdistettua osasävelille.



KUVIO 1. Ensimmäisen ja toisen resonanssin (kuvassa F₁ ja F₂) taajuudet eri äänteissä Petersonin ja Barney'n (1952) mukaan. Kuva on peräisin teoksesta *Principles of Voice Production* (Titze, 2000).

TAULUKKO 1. Vokaalien [ʌ], [ɛ] ja [i] kaksi matalinta resonanssia.

<i> yhdysvaltalaiset </i>			<i> suomalaiset </i>		
äänne	R1 (Hz)	R2 (Hz)	vokaali	R1 keskiarvo (Hz)	R2 keskiarvo (Hz)
[ʌ]	600 - 700	1100 - 1400	/a/	658	1190
[ɛ]	500 - 600	1700 - 2000	/e/	517	1960
[i]	200 - 300	2000 - 2500	/i/	300	2262

2.3 Resonanssitaktiikat

Tässä tutkimuksessa resonanssitaktiikaksi nimitetään laulajan tietoista tai tiedostamatonta tapaa muunnella ääntöväylän akustisia ominaisuuksia sävelkorkeuden ja vokaalin suhteen niin, että laulettu äänen yksi tai useampi osasävel hyötyy mahdollisimman paljon ääntöväylän resonanssien vaikutuksesta. Resonanssitaktiikoita on tutkittu aiemmin samankaltaisessa kontekstissa. Miespuolinen ei-klassinen laulu on kuitenkin jäänyt näissä tutkimuksissa vähemmälle huomiolle. Tutkimuksissa, joissa on tutkittu myös ei-klassista mieslaulua, on tyypillisesti ollut koehenkilöinä klassisesti koulutettuja laulajia (esim. Sundberg ym., 2013) tai tutkittava ääniala ei ole käsittänyt korkeita säveliä rekisterirajan yläpuolella (esim. Björkner, 2008). Resonanssitaktiikoiden merkityksen voidaan olettaa korostuvan juuri sävelkorkeuden noustessa ja osasävelten välisten etäisyyksien kasvaessa. Lisäksi korkeilla sävelillä äänihuulivärähtely saattaa olla hankalampi pitää yllä äänihuulikudoksen ollessa jäykempi kuin matalilla sävelkorkeuksilla. Tällöin väylän rooli äännössä voi korostua entisestään.

Alla olevista tutkimuksista suurin osa perustuu sille olettamukselle, että osasävelet vahvistuvat lineaarisen lähde-suodin teorian mukaisesti voimakkaimmin resonanssitaajuuden kohdalla. Viimeiseksi esitellyssä Titzen ja Worleyn (2009) julkaisemassa tutkimuksessa tulkitaan osasävelten voimistuvan epälineaarisen lähde-suodin teorian periaatteiden mukaisesti resonanssitaajuuksien alapuolella taajuusriippuvaisen positiivisen reaktanssin vaikutuksesta. Epälineaarisen lähde-suodin teorian mukaan myös äänihuulivärähtely hyötyy väylän positiivisen reaktanssin vaikutuksesta (Titze, 2008).

Äänteitä kuvailtaessa on pääasiassa käytetty yleisen foneettisen kuvailutason merkintätapaa, jossa tarkekirjoitus merkitään hakasulkeisiin (esim. [ʌ:]). Aiempaa tutkimusta esiteltäessä on kuitenkin käytetty aina alkuperäisen tutkimuksen merkintätapaa. Näin ollen joissain tapauksissa

äänteitä kuvaavat symbolit on kirjoitettu vinoviivojen väliin (esim. /a:/), mikä on tyypillisempää käytettäessä kielellistä foneemista kuvailutasoa.

2.3.1 Aiempaa tutkimusta resonanssitaktiikoista

Bestebreurtje ja Schutte (2000) tutkivat resonanssitaktiikoita belttaus-laulussa. He määrittelivät belttaus-laulun laulutavaksi, jossa korkeat sävelet lauletaan raskaammalla rintarekisterillä toisin kuin klassisessa laulutavassa, jossa ne tuotetaan tavanomaisesti pää- tai keskirekisterillä. Heidän tutkimuksessaan toimi koehenkilönä yksi naispuolinen blueslaulaja. He analysoivat koehenkilönsä laulua kahdella sävelkorkeudella: G4 (n. 392 Hz) ja Bb4 (n. 466 Hz) sekä neljällä eri vokaalilla: [a:], [i:], [u:] ja [ɛ:]. Koehenkilö lauloi jokaisen vokaalin sekä belttaamalla että puheenomaisesti. Äännöistä tallennettiin elektroglossografia (EGG), suun paine sekä akustinen signaali spektrianalyysiä varten. Kerätyistä näytteistä Bestebreurtje ja Schutte tutkivat miten puheenomaisessa laulussa ja belttauksessa ääntöväylän resonanssitaajuudet erosivat toisistaan ja miten kaksi matalinta resonanssitaajuutta sijoittuivat belttauksessa äänen osasäveliin nähden. Vokaalilla [a:] molemmissa laulutavoissa ja molemmilla sävelkorkeuksilla he päättelivät kahden matalimman resonanssitaajuuden vahvistavan yhdessä toista osasäveltä (H2), kolmatta osasäveltä (H3) ja neljättä osasäveltä (H4). Belttauksessa vokaalilla [ɛ:] toinen resonanssi (R2) pysytteli viidennen osasävelen (H5) tuntumassa molemmilla sävelillä toisin kuin puheenomaisessa äännössä, jossa sen taajuuteen ei vaikuttanut sävelkorkeus. Tällä perusteella Bestebreurtje ja Schutte tulkitsivat, että kyseisellä vokaalilla R2:n taipumus vahvistaa H5:tä belttauslaulussa olisi resonanssitaktiikka. Vokaalilla [i:] tutkijat havaitsivat, että resonanssien virittämistä osasävelten kohdalle ei tapahtunut. He katsoivat kuitenkin, että toisen resonanssin (R1) siirtäminen pois H1:n taajuudelta kahden matalimman osasävelen väliin olisi belttauksen kannalta merkityksellinen strategia. Vokaalilla [u:] belttaus-laulussa sekä R1 että R2 olivat korkeammilla taajuuksilla kuin puheenomaisessa äännössä. Lisäksi R1 nousi H1:n ja H2:n väliin pois H1:n taajuudelta ja R2 virittyi H3:n kanssa samalle taajuudelle. (Bestebreurtje & Schutte, 2000.)

Schutte, Miller ja Duijnste (2005) tutkivat 60 konserttiäänitteestä 34 klassisen ammattitenorin sävelellä Bb4 (n. 466 Hz) laulaman vokaalin [o] spektrit. Kaikkien laulajien spektrit muodostettiin saman musiikkiteoksen (aaria Celeste Aida Verdin oopperasta Aida) sellaisesta kohdasta, jossa laulaja lauloi kyseisen sävelen ilman orkesteria. Yleisimmässä tapauksessa Schutte ym. tulkitsivat tenorien vahvistavan H3:a R2:n avulla. Tätä strategiaa käytti 34 laulajasta 24 ainakin yhdessä esityksistään. Selvimmissä tapauksissa H3 oli vähintään 12 dB voimakkaampi kuin mikään muu spektrin komponentti. Toiseksi yleiseksi resonanssitaktiikaksi Schutte ym. ehdottivat

laulajanformanttistrategiaa, jossa spektrin energiakeskittymä syntyi taajuusalueella 2300 Hz – 3300 Hz resonanssien R3, R4 ja R5 yhteisvaikutuksesta. (Schutte, Miller, & Duijnste 2005.)

Neumann, Schunda, Hoth ja Euler (2005) tutkivat akustisten parametrien muutoksia klassisilla mieslaulajilla rekisterivaihdoksen yhteydessä (rinta-pää) avoimilla vokaaleilla [a:] ja [ɔ:]. Koehenkilöinä heidän tutkimuksessaan toimi neljä tenoria, neljä baritonia ja kolme bassoa, jotka ohjeistettiin laulamaan asteikkoa molemmilla vokaaleilla rekisterivaihdoskohdan yli. Koehenkilöiltä tallennettiin akustisen signaalin lisäksi myös elektroglossografia (EGG). Neumannin ym. tuloksista oli nähtävissä, että kaikkien koehenkilöiden spektreissä rintarekisterin yläpäässä toinen ja neljäs osasävel olivat voimakkaampia kuin ensimmäinen ja kolmas osasävel. Rekisterivaihdoksen jälkeen kolmas osasävel siirtyi spektrin hallitsevaksi komponentiksi. Sama ilmiö näkyi molemmilla vokaaleilla. Tutkija arvioivat, että rekisterivaihdoskohdan tuntumassa R1 laskeutui alaspäin H1:n ja H2:n väliin samalla kun R2 laskeutui matalammalle vahvistamaan H3:a. Sävelkorkeuden noustessa rintarekisterissä R1 seurasi H2:ta ja R2 H4:ää kun taas rekisterirajan yläpuolella R2 seurasi H3:a R1:n pysytellessä H1:n ja H2:n välissä. Kun koehenkilöt tuottivat samat ääntötehtävät vastoin klassisen laulun estetiikkaa pysytellen rintarekisteriäännessä myös asteikon korkeimmilla sävelillä, H2 oli koko ajan spektrin voimakkain komponentti. Neumannin ym. nimittivät tutkimuksessaan vokaalia [a:] takavokaaliksi. Näin ollen on mahdollista, että heidän tutkimuksessaan kyseinen merkintä viittasi avoimeen takavokaaliin [ʌ:] tai [ɑ:].

Sundberg, Lå ja Gill (2013) tutkivat klassisesti koulutettujen mieslaulajien klassista ja ei-klassista laulua rekisterivaihdoskohdan (E4–G4) tuntumassa ja yläpuolella. Heidän kahdeksan koehenkilöänsä lauloivat nousevia ja laskevia asteikkoja vokaaleilla /a/, /i/, /u/ ja /ae/ eri sävelkorkeuksilta. Tallennetuista näytteistä tutkittiin resonanssitaajuudet käännteissuodatuksen avulla, minkä jälkeen resonanssitaajuuksien ja matalimpien osasävelten suhteita analysoitiin. Sundberg ym. havaitsivat, että ei-klassisissa versioissa R1 ja R2 taajuudet olivat tyypillisesti suurempia kuin klassisissa versioissa. Laulajilla ei ollut käytössään yhteistä systemaattista tapaa virittää väylän resonansseja minkään osasävelen kohdalle kummassakaan laulutavassa. Rekisterirajan tuntumassa ja yläpuolella resonanssit osuivat sävelkorkeuden noustessa osasävelten kohdalle vain harvoin ja lähinnä sattumalta. Klassisessa laulussa korkeimmissa äänissä vokaaleilla /a/ ja /ae/ kolmen matalimman osasävelen välillä yhtenevä piirre oli spektrin kasvava muoto ($H1 < H2 < H3$). Tutkijat oletivat tämän spektrin muodon olevan kuitenkin tuotettu eri laulajilla hieman erilaisilla resonanssitaajuuksilla. Samanlaisia tuloksia saivat Sundberg, Lå, ja Gill (2011) myös aiemmin kahdeksalla laulajalla vastaavanlaisessa tutkimuksessa, joka rajoittui vokaaliin /a/. Kyseisessä tutkimuksessa oli havaittavissa klassisissa näytteissä sama spektrin kasvava muoto kolmen ensimmäisen osasävelen kohdalla ja ei-klassisten näytteiden suurempi R1:n taajuus.

Sundbergin ym. (2013) tutkimus ei tukenut sitä olettamusta, että klassiset mieslaulaja hyödyntäisivät merkittävästi resonanssien virittämistä osasäveliin. Tutkimuksessaan he eivät raportoineet tarkkoja koehenkilöidensä tuottamien näytteiden sävelkorkeuksia, mutta heidän kuvaajistaan voi päätellä, että korkeimmat sävelet olivat G4 ja G#4. Osasyys sille, että virittämistä ei ollut havaittavissa voi johtua siitä, että sävelkorkeudet eivät olleet riittävän korkeita. Kuten esim. Neuman ym. (2005) ovat esittäneet, klassisilla mieslaulajilla resonanssitaktiikka yleensä muuttuu juuri rekisterivaihdoskohdan ympäristössä. Näin ollen tutkittaessa ainoastaan rekisterivaihdosaluetta ei resonanssitaktiikkaa ole välttämättä helposti havaittavissa. Systemaattisen virittämisen havaitsemiseksi on analysoitava useampi rekisterivaihdosalueen yläpuolinen sävel, jotta nähtäisiin miten resonanssien taajuudet muuttuvat sävelkorkeuden ja osasävelkorkeuksien muuttuessa.

Henrich, Smith ja Wolfe (2011) tutkivat sekä klassisten mies- että naislaulajien tapaa virittää ääntöväylän resonansseja äänen osasävelten kohdalle ja tuntumaan. He käyttivät resonanssitaajuuksien määrittämisessä suun ulkopuolelta ääntöväylään äännön aikana syötettävää akustista herätettä (menetelmä kuvataan tarkemmin jäljempänä). Koehenkilöinä heidän tutkimuksessaan toimi 22 klassista laulajaa. He havaitsivat, että sekä klassisilla miesäänillä että klassisilla naisäänillä R1 ja R2 muuttuivat laulussa sävelkorkeuden muuttuessa sen sijaan, että ne olisivat pysyneet samalla taajuudella kuin puheessa. Selkeimmät esimerkit resonanssien virittämisestä jonkin osasävelen kohdalle löytyivät sopraanolaulajilta korkeilla sävelillä, joilla R1 oli usein H1:n (perustaajuus) kohdalla ja R2 H2:n kohdalla. Heinrichin ym. (2011) tuloksista oli nähtävissä, että miesäänillä R1 osui usein H2:n kanssa saman taajuuden tuntumaan erityisesti rekisterivaihdoskohdan ympäristössä. R1:n viritys H2:n tuntumaan ulottui korkeimmalle vokaaleilla [ə:] (sanassa *heard*) ja [a:] (sanassa *hard*). (Henrich ym. 2011.)

Bourne ja Garnier (2010) vertailivat kahta laulutapaa sävelkorkeuksilla F#4 – D5. Vertailussa olleet laulutavat olivat legit-laulutapa (klassiseen laulutapaan viittaava termi) ja chesty belt -laulutapa (ei-klassiseen voimakkaaseen laulutapaan viittaava termi). Koehenkilöinä toimi neljä naispuolista musiikkiteatterilaulun ammattilaista ja kaksi naispuolista musiikkiteatterilaulun edistynyttä opiskelijaa. Tutkitut vokaalit olivat [E] ja [o]. Molemmilla vokaaleilla R1 oli chesty belt laulutavassa korkeammalla kuin legit laulutavassa. Chesty belt laulutavassa kaikilla koehenkilöllä yhtä lukuun ottamatta R1 seurasi H2:ta sävelkorkeuden noustessa. Legit laulutavassa ei ollut havaittavissa resonanssien säännönmukaista virittämistä osasäveliin. R2:n virittämistä osasäveliin ei ollut havaittavissa kummassakaan vokaalissa tai laulutavassa.

Titze ja Worley (2009) vertailivat miespuolista klassista- ja belttaus-laulua sävelkorkeudella A4 sekä matemaattisen mallin pohjalta että tunnettujen ammattilaulajien äänitteiden spektreistä. Klassisten laulajien spektrit tutkittiin vokaalista /ɔ/ ja belttaajien vokaalista /a/. Belttaajien

spektreissä tyypillinen piirre oli voimakas H2, joka Jazz-laulaja Cab Callowayn spektrissä oli noin 30 dB voimakkaampi kuin perustaajuus F0. Klassisten laulajien spektreissä energia jakautui tasaisemmin kolmelle matalimmalle osasävelelle siten, että H3 oli osasävelistä voimakkain. Titze ja Worley (2009) tulkitsevat mallinnustulosten pohjalta, että belttajilla H2 voimistui R1:n alapuolisen positiivisen reaktanssin vaikutuksesta kun taas klassisilla laulajilla H3 ja H2 R2:n alapuolisen positiivisen reaktanssin vaikutuksesta ja H1 R1:n alapuolisen positiivisen reaktanssin vaikutuksesta. Klassisilla laulajilla oli myös voimakkaampi lauluformantti, jonka mallinnuksen perusteella sai aikaan kapea kurkunpään eteisonkolo. Lisäksi subglottaalinen negatiivinen reaktanssi saattoi myötävaikuttaa klassisten näytteiden spektreissä kolmen matalimman osasävelen voimistumiseen. (Titze & Worley 2009.)

Kuten edellä esitellyistä tutkimuksista on havaittavissa, tähän mennessä tutkimuksissa on käsitelty vain vähän miespuolista ei-klassista laulua. Pohja tämän tutkimuksen hypoteeseille rakennetaan pääasiassa klassiselle laululle ja naispuoliselle belttaus-laululle ehdotetuista resonanssitaktiikoista. Taulukkoon 2 on kerätty yhteenvedo kirjallisuudesta löydettyistä yleisimmistä resonanssitaktiikoista.

TAULUKKO 2. Resonanssitaktiikat kirjallisuudesta.

vahvistaja ---> vahvistettava	Sukupuoli / Tyyli	vokaalit	sävelkorkeus	Ehdottanut
R1 ja R2 ---> H2, H3, H4	N / belttaus	[a:]	G4 & Bb4	Bestebreurtje, ME & Schutte, HK (2000)
R2 ---> H5	N / belttaus	[ε:]	G4 & Bb4	Bestebreurtje, ME & Schutte, HK (2000)
R2 ---> H3	M / klassinen	[o]	Bb4	Schutte, HK, Miller, GG & Duijnstee, M (2005)
R3,R4 ja R5 ---> 2300Hz - 3300Hz	M / klassinen	[o]	Bb4	Schutte, HK, Miller, GG & Duijnstee, M (2005)
R1 ---> H2 & R2 ---> H4	M / klassinen	[a] & [ɔ]	rintarekisterin korkeimmat	Neumann, K, Schunda, P, Hoth, S & Euler, H (2005)
R2 ---> H3	M / klassinen	[a] & [ɔ]	rinta- ja päärekisterin vaihdos	Neumann, K, Schunda, P, Hoth, S & Euler, H (2005)
? ---> H1, H2 ja H3 (nouseva spektri)	M / klassinen	/a/ & /ae/	rekisterivaihdos ja yläpuolella	Sundberg, J, Lä, FMB & Gill, BP (2011 & 2013)
R1 ---> H1	N / klassinen	[ə], [a], [ɔ] & [u]	korkeat sävelet C5 --->	Henrich, N, Smith, J, Wolfe, J (2011)
R2 ---> H2	N / klassinen	[ə], [a], [ɔ] & [u]	korkeat sävelet C5 --->	Henrich, N, Smith, J, Wolfe, J (2011)
R1 ---> H2	M/klassinen	[ə] & [a]	rekisterivaihdos ja yläpuolella	Henrich, N, Smith, J, Wolfe, J (2011)
R1 ---> H2	N / chesty belt	[ε] & [o]	F#4 - D5	Bourne, T. & Garnier, M. (2010)
R1reaktanssi ---> H2	M / Belttaus	/a/	A4	Titze, IR & Worley AS. 2009
R2reakt. ---> H3 & R1reakt. ---> H1	M / Ooppera	/ɔ/	A4	Titze, IR & Worley AS. 2009

2.3.2 Resonanssitaktiikat laulunopetuksessa

Laulajat muuttavat usein vokaalisävyä jonkin toisen vokaalin suuntaan siirtyessään laulamaan korkeammille sävelille. Vokaalisävyyn muokkaamisen merkitys on tiedostettu myös laulupedagogiikan piirissä ja aiheesta on käsitelty jonkin verran pedagogisessa kirjallisuudessa. Tanskalaisen Cathrine Sadolinin kehittämässä Complete Vocal Technique -laulumetodissa eri moodit ovat helpoimmin tuotettavissa tietyillä vokaaleilla erityisesti siirryttäessä laulamaan korkeita säveliä (Sadolin, 2008). Donald Millerin kirjassa *Resonance in Singing: Voice Building Through Acoustic Feedback* pyritään hyödyntämään reaaliaikaisen spektrin tarjoamaa akustis-visuaalista palautetta systemaattisemman osasävelten vahvistamisen ja rekisterivaihdojen hallitsemisen opettelemisessa (Miller, 2008). Laulupedagogi Berton Coffinin kirja *Coffin's Overtones of bel canto* käsittelee vokaalien ja sävelkorkeuksien suhteita foneettisen aakkoston pohjalta. Se sisältää harjoituksia, joiden avulla laulaja voi oppia säätämään vokaalisävyä saavuttaakseen parhaan resonanssien ja osasävelten välisen suhteen eri sävelkorkeuksilla (Coffin, 1980).

2.4 Resonanssitaajuuden määrittäminen laulusta

Resonanssitaktiikoiden tutkimisessa on yhtenä haasteena ääntöväylän resonanssien todellisten taajuuksien selvittäminen. Tämän tutkimuksen kirjallisuuskatsauksessa esitellyistä tutkimuksista väylän resonanssien taajuuksia selvitti spektrin avulla Schutte, Miller ja Duijnste (2005) sekä Neumann, Schunda, Hoth ja Euler (2005), käännteissuodatusta hyödyntäen Sundberg, Lã ja Gill (2011) sekä Sundberg, Lã ja Gill (2013), ääntöväylään suun ulkopuolelta johdettavan laajakaistaisen akustisen herätteen avulla Henrich, Smith, ja Wolfe (2011) sekä Bourne ja Garnier (2010) ja ääntöä välittömästi seuranneen narinan spektristä Bestebreurtje ja Schutte (2000).

Puheäänen korkeudella ja matalassa laulussa resonanssien havaitseminen riittävän tarkasti äänen spektristä on varsin yksinkertaista. Korkeammilla sävelillä osasävelten välisten etäisyyksien kasvaessa ei äänen spektri tarjoa yhtä tarkasti samaa informaatiota. Lisäksi perustaajuuden ja matalimpien osasävelten lähestyessä väylän matalimpien resonanssien taajuuksia alkaa lähteen ja väylän välisen epälineaarisen vuorovaikutuksen merkitys korostumaan (Titze 2008). Tällöin on hankala päätellä voimistuuko osasävel resonanssin kohdalla vai tämän alapuolella positiivisen reaktanssin vaikutuksesta. Lähteen ja suotimen välistä epälineaarista vuorovaikutusta on myös hankala huomioida käytettäessä lineaarista käännteissuodatusta. Siinä etsitään sellaiset resonanssien taajuudet ja kaistanleveydet, että poistettaessa niiden vaikutus audio-signaalista, jää jäljelle mahdollisimman tasainen lähteen spektri ja mahdollisimman rippeliton äänihuulten sulkuvaihe

glottogrammissa (Sundberg ym. 2013). Resonanssitaajuuksien selvittäminen ääntä välittömästi seuraavan narinan spektristä saattaa myös olla jossain määrin epätarkka menetelmä. Siinä pyrkimyksenä on, että ääntä seuraava narina tuotettaisiin äännön kanssa mahdollisimman identtisellä väyläasetuksella. Narinan spektristä voidaan siten visuaalisesti arvioida missä resonanssit sijaitsivat äännön aikana. Väylän asetuksen säilyttäminen voi kuitenkin olla hankalaa siirryttäessä äännöstä narinaan. Kun resonanssien taajuuksia arvioidaan hyödyntämällä ääntöväylän ulkopuolelta syötettävää laajakaistaista akustista herätettä, saadaan kohtuullisen tarkkoja tuloksia virhemarginaalilla plusmiinus 11 Hz (Henrich ym 2011). Tässä menetelmässä ääntöväylään syötetään äännön aikana huulten tasolta kohinaa akustisena herätteenä. Sekä ääntöväylän vaste herätteelle että laulajan tuottama ääntö tallennetaan huulten läheltä mikrofonilla. Tallennetun signaalin spektrissä näkyy laulajan tuottaman äänen osasävelet ja ääntöväylän vaste, jonka muodossa resonanssitaajuudet ovat havaittavissa huippuina (ks. kuvio 3 sivulta 25). Tämä menetelmä vaikuttaa tällä hetkellä olevan virhemarginaaliltaan paras tapa resonanssien äännönaikaisten taajuuksien selvittämiseen.

Tässä tutkimuksessa resonanssien mittaamiseen ja analysointiin pyrittiin valitsemaan sellaiset menetelmät, jotka olisivat mahdollisimman yksinkertaisia toteuttaa, jotta ne saataisiin helposti liitettyä kannettavaan mittauslaitteistoon. Millerin (2008) mukaan väylän resonanssitaajuuksia on mahdollista arvioida spektrissä näkyvän hälyn muodon perusteella. Äännössä syntyy aina jonkin verran hälyä vaikka korva ei sitä välttämättä pysty erottamaan. Matalatasoinen häly näkyy spektrin alalaidassa etenkin osasävelten välisillä alueilla ja sen muodossa on yleensä havaittavissa huippu resonanssin taajuudella. (Miller 2008, 38.) Tässä tutkimuksessa käytettiin hälyn muodon visuaalista tarkastelua resonanssien taajuuksien määrittämisessä. Menetelmän tukena arvioitiin myös osasävelten välisiä voimakkuuseroja.

2.5 Elektroglottografia (EGG)

Elektroglottografialla tallennettu signaali kuvastaa äänihuulten välisen kontaktin määrää äänihuulivärähtelyssä ajan funktiona (Childers, Smith, & Moore, 1984). Se mitataan asettamalla kaulalle kaksi elektrodi, joiden välillä kulkee erittäin pieni korkeataajuuksinen vaihtovirta. EGG mittaa kurkunpään ja sen ympäristön vaihtovirralla asettamaa vastusta eli impedanssia, joka on suurin silloin kun äänirako on maksimaalisesti auki ja pienin kun äänihuulet ovat täysin yhdessä (ks. kuvio 2). Vaikka äänihuulivärähtelyn tuottama impedanssin vaihtelu onkin hyvin pientä suhteessa koko kaulan alueella tapahtuvaan impedanssin vaihteluun, saadaan EGG:llä aikaiseksi varsin hyvin äänihuulikontaktia kuvastava signaali. Tähän auttaa esimerkiksi se, että EGG-laitteet pääsääntöisesti

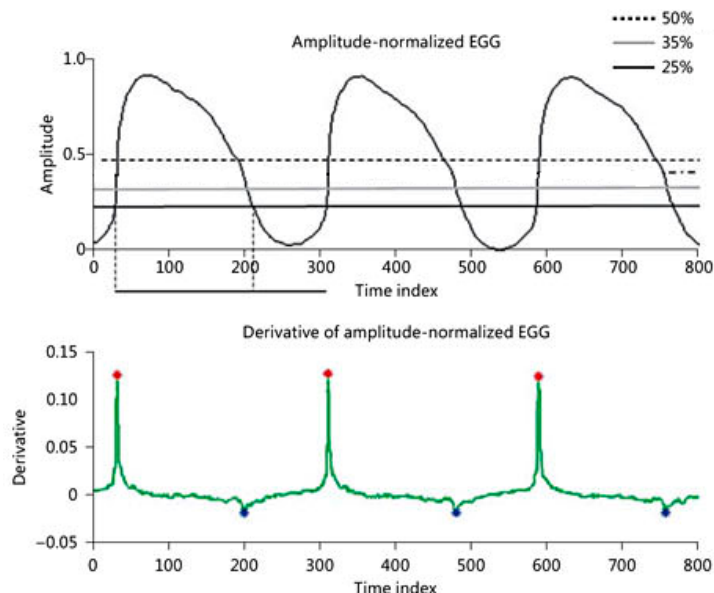
suodattavat signaalista pois hitaat muutokset impedanssissa käyttäen ylipäästösuodatusta. (Baken & Orlikoff, 2000, 413 - 417.)

Yksi EGG:n eduista on siinä, että se on noninvasiivinen menetelmä ja varsin helppo toteuttaa, mikä on hyödyksi esimerkiksi laulajien kanssa työskenneltäessä. Sen avulla tuotettua dataa voidaan hyödyntää myös väylän resonansseja tutkittaessa. Rothenberg (1988) tutki, minkälaisia EGG-signaalissa näkyviä vaikutuksia resonanssitaajuuden äkillisellä pienenemisellä on äänilähteeseen. Koehenkilöinä kyseisessä tutkimuksessa toimi kaksi klassista sopraanolaulajaa, jotka äänsivät useilla sävelkorkeuksilla. Äännön aikana heidän ääntöväyläänsä pidennettiin keinotekoisesti putken avulla. Pidennyksen vaikutuksia tarkkailtiin EGG-signaalista ja havaittiin, että joissain tapauksissa ensimmäisen resonanssin siirtyessä kauemmaksi perustaajuudesta (F0) EGG-signaalin amplitudi pieneni ja pulssi muuttui kapeammaksi. Tämä tapahtui molemmilla laulajilla heidän ääntämillään korkeimmilla sävelillä (Ab5, n. 831 Hz) vaikkakin toisen laulajan kapeammalla sävelalueella. Rothenberg arvioi eron johtuvan laulajien välillä olevista eroista äänihuulivärähtelyn stabiiliudessa. Toisella laulajalla resonanssitaajuuden pienentäminen vaikutti EGG:n aaltomuotoon pienemmällä sävelvälillä mahdollisesti vakaamman äänihuulivärähtelyn ansiosta. Virityksen merkityksen Rothenberg arvioi yleisesti korostuvan taajuusalueilla, joilla äänihuulivärähtelyn mekanismi on jo valmiiksi alttiimpi epävakaudelle. Tällainen taajuusalue voisi olla esimerkiksi rekisterin vaihdoskohta. (Rothenberg, 1988.)

EGG-signaalissa mahdollisesti nähtävien äänilähteen ja resonanssien välisten yhteyksien lisäksi tämän tutkimuksen kiinnostuksen kohteena oli kuinka suuren ajan äänihuulivärähtelyn periodista äänirako on suljettuna. Resonanssien aikaansaama vaikutus äänihuulivärähtelyn synnyttämän äänen aaltomuotoon on teoriassa suurin juuri silloin kun äänirako on kiinni (Miller 1959; Eldhuis & Yegnanarayana 1998). Lisäksi, mitä pidempi sulkuvaihe on kestoltaan, sitä enemmän lähteen spektriin perustaajuuden yläpuolisille osasävelille syntyy energiaa. Pelkästään äänihuulivärähtelyn pitkän sulkuvaiheen ansiosta voi syntyä voimakkaan ja resonoivan kuuloinen ääni. (Titze 2000, 131; Titze 2009.) Äänentuotto voi siis käytännössä nojata suurelta osin äänilähteen toimintaan. Tällaisen äännön seurauksena äänihuulikudos voi kuitenkin olla suuremman rasituksen alaisena (Verdolini, Chan, Titze, Hess & Bierhals 1998).

Äänihuulivärähtelyn sulkuvaiheen kestoa tutkittaessa lasketaan tyypillisesti kontaktiosamäärä (contact quotient, CQ) jakamalla äänihuulivärähtelyn sulkuvaiheen kesto värähtelyn periodin kokonaiskestolla. Näin saadaan luku, joka on arvoltaan nollan ja yhden väliltä. Mitä lähempänä CQ:n arvo on lukua yksi, sitä suuremman osan värähtelyn periodista äänihuulten välillä on kontaktia. CQ:n laskeminen ei ole täysin yksinkertaista, koska EGG-signaalista on vaikea tunnistaa tarkkaa sulkuvaiheen alku- ja loppuhetkeä. Näiden hetkien arvioimiseksi on käytetty menetelmää, jossa

ääniraon katsotaan sulkeutuvan ja avautuvan kun EGG-signaali ylittää tason, joka voidaan määritellä olemaan esimerkiksi 25%, 35% tai 50 % koko signaalin amplitudista (ks. kuvio 2) (M Rothenberg & Mahshie, 1988). On myös arvioitu, että sulkuvaiheen alku- ja loppuhetket voisivat olla yhteydessä ajan hetkiin, joina signaalin ensimmäinen derivaatta saa positiivisen ja negatiivisen maksimiavaruensa (ks. kuvio 2) (Childers, Hicks, Moore, Eskenazi, & Lalwani, 1990). Johtopäätöstä siitä, että näin olisi aina, ei ole kuitenkaan voitu tehdä. On raportoitu, että kun derivaatan aaltomuodossa negatiivisen tai positiivisen maksimiavaruksen yhteydessä esiintyy kaksoispiikki, ei kumpikaan piikeistä kuvasta riittävän tarkasti hetkeä, jona äänihuulivärähtelyn sulkuvaihe saa alkunsa tai päättyy (Childers, Hicks, Moore, & Alsaka, 1986; Henrich, d'Alessandro, Doval, & Castellengo, 2004). Herbstin, Lohschellerin, Švecin, Henrichin, Weissengruberin ja Fitchin (2014) tekemässä aihetta käsittelevässä tuoreimmassa tutkimuksessa saatiin myös tuloksia, jotka eivät tukeneet oletusta, että EGG-signaalin ensimmäisen derivaatan maksimiavaruksat kuvastaisivat aina äänihuulivärähtelyn sulkuvaiheen alku- ja loppuhetkiä. Herbstin ja Ternströmin (2006) mukaan todenmukaisin arvo CQ:lle saadaan, kun sulkuvaiheen alku- ja loppuhetket määritetään ajanhetkinä, joina signaali ylittää 20% tai 25% koko signaalin amplitudista. Heidän tutkimuksessaan näin laskettu CQ:n arvo vastasi paremmin kymografian avulla määritettyä kontaktiastetta kuin CQ:n arvo, joka saatiin käyttämällä derivaattamenetelmää. Näiden tutkimusten tulosten valossa tässä tutkimuksessa käytetään äänihuulivärähtelyn sulkuvaiheen keston määrittämisessä ajan hetkiä, joina signaalin taso ohittaa 25 % signaalin kokonaiskorkeudesta.



KUVIO 2. Ylemmässä kuvassa on esimerkki EGG-signaalista. Aaltomuoto kasvaa sitä mukaan kun kontakti äänihuulten välillä lisääntyy ja impedanssi pienenee. Alemmassa kuvassa on signaalin ensimmäisen derivaatan aaltomuoto, jonka negatiiviset ja positiiviset maksimikohdat on merkitty punaisella ja sinisellä pisteellä. (Kankare, Liu, Laukkanen & Geneid, 2013, muokattu)

2.6 Tutkimustavoitteet, -kysymykset ja hypoteesit

Tutkimuksen tavoitteena oli tuoda lisäinformaatiota siihen, minkälaisia resonanssitaktiikoita miespuolisten ei-klassisten laulajien on mahdollista käyttää korkeilla sävelillä rekisterirajan tuntumassa ja yläpuolella voimakkaassa laulussa. Tutkimus rajattiin kolmeen vokaaliin [ʌ:], [ɛ:] ja [i:]. On todennäköistä, että laulajalla ei ole mitään yhtä ainoaa tapaa toimia, vaan että vaihtoehtoja on useita, kuten klassisten laulajien kohdalla on aiemmin havainnut mm. Schutte ym. (2005) ja Sundberg ym. (2013). Tätä runsaasti tutkittua aihetta yritetään tässä tutkimuksessa avata myös ei-klassisten mieslaulajien kohdalla erityisesti sellaisella sävelalueella, jolla resonanssitaktiikoilla voidaan olettaa olevan suurtakin merkitystä äänentuoton kannalta.

2.6.1 Tutkimuskysymykset

Tutkimuksella pyrittiin löytämään vastaukset ainakin seuraaviin kysymyksiin:

1. Miten tutkimuksen koehenkilöinä toimineilla laulajilla resonanssitaajuudet muuttuvat sävelkorkeuden noustessa ja minkälaisissa suhteissa ne ovat osasäveliin varsinkin rekisterirajan yläpuolisilla sävelillä?
2. Minkälaisia resonanssitaktiikoita voidaan tutkimusaineiston perusteella arvioida koehenkilöillä olevan käytössä?
3. Vaikuttaako elektrolottografian avulla mitattuihin äänilähteen ominaisuuksiin resonanssien ja niitä lähimpänä olevien osasävelten välinen etäisyys?

2.6.2 Hypoteesit

Vokaalilla [ʌ:] oletetaan toisen osasävelen (H2) olevan spektrin hallitseva komponentti ääntöväylän ensimmäisen resonanssin (R1) vahvistamana. Vahvistus voisi tapahtua joko lineaarisen lähde-suodin teorian mukaisesti resonanssin kohdalla tai epälineaarisen lähde-suodin teorian mukaisesti resonanssin alapuolella. Voimakasta kolmatta osasäveltä ei pidetä todennäköisenä, koska se on kirjallisuuden perusteella rekisterirajan yläpuolella tavanomaisempi klassiselle miesäänelle.

Taulukosta 2 katsottuna vokaalilla [ɛ:] voisi mahdollisia resonanssitaktiikoita olla R1:n virittyminen H2:n tuntumaan tai R2:n virittyminen H5:n tuntumaan. Nämä kaksi resonanssitaktiikkaa voisivat esiintyä myös mahdollisesti samanaikaisesti. Niistä ensimmäisen ovat

raportoineet Bestebreutje ja Schutte (2000) ja jälkimmäisen Bourne ja Garnier (2010). Taulukosta 1 katsottuna R2 liikkuu myös H4:n kanssa samalla taajuusalueella rekisterirajan yläpuolella sävelvälillä G4 – A#4. Belttaukselle on kuitenkin tyypillistä suun runsas avoimuus (ks. Titze & Worley 2009) mikä nostaa molempia resonansseja R1 ja R2 ylöspäin. Näin ollen R2:n virittymistä H4:n taajuudelle ei pidetä todennäköisenä.

Vokaalilla [i:] ei oleteta Bestebreutjen ja Schutten (2000) tutkimuksiin perustuen näkyvän resonanssien virittymistä suoraan osasävelten kohdalle. Ensimmäinen resonanssi tulee mahdollisesti virittymään pois H1:n taajuudelta H1:n ja H2:n väliin. Myös Titze, Mapes, ja Story (1994) ovat esittäneet, että voimakas H1 ensimmäisen resonanssin vahvistamana saattaisi tehdä äänenväristä klassiselle naisäänelle ominaisen. Jos resonanssien virittymistä ilmenisi, todennäköisesti R2 tulisi virittymään korkeampien osasävelten kuten H5 tai H6 läheisyyteen.

Aiemman teorian perusteella ääntöväylällä on vaikutusta myös äänilähteen toimintaan. Resonanssien viritys saattaa vaikuttaa elektroglossografian avulla mitattuihin äänilähteen ominaisuuksiin kuten Rothenberg (1988) on osoittanut. Hänen tulostensa perusteella resonanssien virittyminen lähelle osasäveliä saattaa johtaa suurempaan EGG:n aaltomuodon amplitudiin ja paksumpaan pulssin muotoon kuin resonanssien sijoittuminen etäämmälle osasävelistä. Näin ollen tämän tutkimuksen koehenkilöillä tilastollisen analyysin perusteella esimerkiksi kontaktiaste (CQ) saattaisi vaihdella sen mukaan kuinka lähellä resonanssit ja osasävelet ovat toisiaan.

3 MENETELMÄT

3.1 Koehenkilöt

Tutkimuksen koehenkilöinä toimi neljä miespuolista laulajaa. Heidän taustojaan, tyypillistä repertuaariaan, laulukuntoaan, äänialaansa ja terveyden tilaansa selvitettiin kyselylomakkeella. Alla on lyhyt kyselylomakevastausten perusteella tehty tiivistys jokaisesta koehenkilöstä.

Koehenkilö 1 oli 33 vuotias laulaja / laulunopettaja. Näytteiden nauhoitusajankohtana hän viimeisteli musiikkikasvatuksen opintojaan Sibelius-Akatemiassa, jossa hän on ottanut sekä klassisia että pop/jazz laulutunteja. Hän on kouluttautunut lisäksi valtuutetuksi Complete Vocal Technique -opettajaksi vuosina 2007 – 2009. Hän on työskennellyt musikaaliproduktioissa, julkaissut laulajana levyn ja esiintynyt erilaisissa tilaisuuksissa sekä televisio-ohjelmissa. Laulunopettajan tehtävissä hän on toiminut omassa yrityksessään vuodesta 2007 lähtien ja on lisäksi opettanut noin kaksi vuotta yksityisessä musiikkikoulussa sekä tehnyt tuntiopettajan töitä Sibelius-Akatemiassa. Musiikin tyylilajeista hän koki edustavansa parhaiten populaarimusiikkia ja musiikkiteatterilaulua. Hän ilmoitti äänenkäyttönsä rekisterirajan yläpuolella sävelvälillä F#4 - A#4 olevan täysin vaivatonta ja käyttävänsä tätä sävelväliä esittämässään musiikissa reilusti muutenkin kuin falsetti- tai ohennerekisterissä. Näytteiden nauhoitusajankohtana hän ei raportoinut tekijöitä, jotka olisivat vaikuttaneet negatiivisesti hänen lauluääneensä, vaikka ilmoittikin jälkikäteen äänensä toimineen parhaiten vasta myöhemmin kyseisenä päivänä, jona mittaukset suoritettiin.

Koehenkilö 2 oli 45 vuotias laulaja, joka on toiminut myös laulunopettajana pitäen sekä yksityis- että ryhmätunteja. Laulua hän oli opiskellut Kauhajoen evankelisessa opistossa vuosina 1991 – 1993, Helsingin Pop & Jazz Konservatorion muusikkolinjalla vuosina 1993 – 1995 ja tenori Petri Bäckströmin oppilaana yksityistunneilla vuosina 2000 – 2003. Koehenkilön 2 urallaan tekemiinsä työtehtäviin lukeutuivat musikaalit, dubbaukset sekä erilaiset keikat aina hevimusiikista iskelmään. Hän oli toiminut lauluyhtyeissä ja taustalaulajana niin studiossa kuin liveinäkin ja esiintynyt myös televisio-ohjelmissa. Musiikin tyylilaji, jota hän koki parhaiten edustavansa, oli Classic Rock. Hän kuvasi käyttävänsä esittämässään musiikissa niin sanottua täyttä ääntä sävelvälillä F#4 – A#4 (n. 370 Hz – 466 Hz) ja koki laulavansa tällä sävelvälillä varsin vaivattomasti. Sävelvälin matalimman ja korkeimman sävelen hän ilmoitti kuitenkin olevan hieman hankalammin

tuotettavissa kuin sävelvälin muiden nuottien. Näytteiden nauhoitushetkellä hän oli parantumassa pitkäkestoisesta yskästä, minkä hän raportoi vaikuttaneen hieman laulumukavuuteensa.

Koehenkilö 3 oli 32 vuotias laulaja / muusikko, joka valmistui vuonna 2012 Complete Vocal Instituteesta sekä Pop & Jazz Konservatoriolta laulajaksi aikuisten näyttötutkinnon kautta. Hän oli työskennellyt vuodesta 2001 lähtien freelancer laulajana sekä näyttelijänä ja kuvasi käyttävänsä ääntään monipuolisesti hyödyntäen erilaisia äänenvärejä ja efektejä roolien ja kappaleiden vaatimusten mukaan. Tyyllilajeista hän koki parhaiten edustavansa soul-, jazz-, rock-, pop- ja musikaalityylejä. Hän ilmoitti käyttävänsä suurimmassa osassa esittämäänsä musiikkia ääntään sävelvälillä F#4 – A#4 muutenkin kuin falsetti- tai ohennerekisterissä ja pystyvänsä laulamaan tällä sävelvälillä täysin vaivattomasti. Näytteiden äänityshetkellä hän ei kokenut minkään tekijän vaikuttavan negatiivisesti lauluääneensä.

Koehenkilönä 4 oli 35 vuotias laulaja / säveltäjä / muusikko. Hän oli valmistunut Metropolia ammattikorkeakoulun pop / jazz – musiikin koulutusohjelmasta muusikkolinjalta laulajaksi ja toiminut laulajana, taustalaulajana ja kitaristina konserttisaleissa, ravintoloissa, teatterissa, laivalla ja yksityistilaisuuksissa. Hän ilmoitti yleensä esiintyvänsä kitaristilaulajana ja vain harvoin ainoastaan laulajana. Musiikin tyyllilajeista hän koki parhaiten edustavansa progressiivista rockia, Groove jazzia, folkia ja bluesrockia. Hän ilmoitti käyttävänsä esittämässään musiikissa vaihtelevasti sävelväliä F#4 - A#4 riippuen kulloisestakin tyyllilajista. Kyseisen sävelvälin hän ilmoitti pystyvänsä tuottamaan muuten kuin falsetti- tai ohennerekisterissä täysin vaivattomasti korkeimman nuotin vaatiessa kuitenkin huolellisen lämmittelyn. Ääninäytteiden nauhoitushetkellä hän oli toipumassa flunssasta ja koki, ettei hänen äänensä ollut täysin parhaassa mahdollisessa kunnossa. Lisäksi hänen viimeisimmät työprojektinsa olivat liittyneet sovittamiseen ja kapellimestarin työhön ja vähemmän laulamiseen, mikä saattoi myös jonkin verran vaikuttaa hänen laulukuntoonsa.

3.2 Mittaukset ja laitteet

Mittaukset tehtiin kannettavalla mittauslaitteistolla, johon kuului Asus G551JM - merkinen kannettava tietokone ja EGGs for singers - merkinen EGG-laite. EGG-laitteeseen kuului pääpantamikrofonin, jolla akustinen signaali tallennettiin. Sekä EGG-signaali että akustinen signaali kulkivat ulkoisen USB-äänikortin kautta kannettavaan tietokoneeseen, jossa ne tallennettiin käyttäen Cubase 7.5 tietokoneohjelmaa. Tallennuksessa käytetty näytteenottotaajuus oli 44100 Hz ja bittisyvyys 16 bittiä. Ulkoinen äänikortti, jota käytettiin ensimmäisenä nauhoitetun koehenkilön kohdalla (koehenkilö 2), oli Motu UltraLite-mk3 Hybrid. Koska kyseinen äänikortti osoittautui EGG-laitteen kanssa huonosti yhteensopivaksi, käytettiin kolmen muun koehenkilön kohdalla

Roland QUAD-CAPTURE - merkkistä äänikorttia. MOTU-äänikorttia käytettäessä akustiseen signaaliin syntyi lievää yliohjautuneisuutta ja EGG-signaaliin enemmän kohinaa kuin Rolandin äänikortilla. Äänenpainetason kalibrointia varten jokaiselta koehenkilöltä tallennettiin tasainen vokaaliääntö, jonka äänenpainetaso (SPL) mitattiin 40 cm etäisyydeltä huulista ja lausuttiin tallenteelle. Äänenpainetason mittaukseen käytettiin Minialyzer-äänenpainemittaria. Koska kaikki koehenkilöt olivat aikatauluiltaan kiireisiä, äänitykset päädyttiin tekemään kannettavalla mittauslaitteistolla koehenkilön valitsemassa paikassa. Näin ollen tila, jossa mittaukset suoritettiin, vaihteli koehenkilöittäin. Kaksi koehenkilöä äänitettiin musiikin tekemiseen tarkoitettussa studiotilassa, joka oli osittain akustoitu. Yksi koehenkilö tilassa, jossa hän toimii laulunopettajana ja yksi keikkapaikalla tamperelaisen ravintola takahuoneessa.

3.3 Ääntötehtävät

Jokaista koehenkilöä pyydettiin suorittamaan neljä erilaista ääntötehtävää. Ensimmäisessä tehtävässä heitä pyydettiin lausumaan vokaalit [ʌ:], [ɛ:] ja [i:] noin kolmen sekunnin pituisina ääntöinä. Toisessa tehtävässä suoritettiin sama siten, että puheääni korvattiin narinarekisteri-äännöllä. Kahden ensimmäisen tehtävän avulla tutkittiin koehenkilöiden äänestä heidän luonnolliset puheelle ominaiset matalimpien resonanssien taajuudet. Kolmannessa tehtävässä laulajia pyydettiin laulamaan yhdeksällä sävelkorkeudella (D4 – A#4) kolme englanninkielen sanaa: love, let ja leave. Jokainen sana tuli laulaa niin pitkänä, että sen sisältämä vokaali ([ʌ:], [i:] tai [ɛ:]) olisi kestoltaan vähintään kaksi sekuntia. Laulajia ohjeistettiin ajattelemaan jokaisen äännön olevan pop-, rock-, soul- tai jonkin muun ei-klassisen musiikkiteoksen huippunuotti. Kaikki kolme vokaalia laulettiin ensin yhdellä sävelkorkeudella, jonka jälkeen siirryttiin seuraavalle sävelkorkeudelle kromaattisesti ylöspäin. Näin päätettiin toimia sen sijaan, että yhdellä vokaalilla oltaisi ensin laulettu kaikki yhdeksän sävelkorkeutta. Tarkoituksena oli saada laulaja vaihtamaan artikulaatioelimistön asentoa jokaisen äännön jälkeen, jotta tilanne muistuttaisi enemmän laulamista. Näin mahdollisimman tarkan ja tehokkaan resonanssiasetuksen käyttöönoton oletettiin myös vaikeutuvan ja resonanssitaktiikan merkityksen korostuvan entisestään. Neljännessä ääntötehtävässä laulajien oli määrä laulaa kaikki kolme sana samalla periaatteella kuin tehtävässä kolme, kuitenkin niin, että jokainen vokaali äännettiin vain kahdella sävelkorkeudella. Tehtävän tarkoituksena oli tuottaa tietoa siitä, olivatko äännöistä mitatut resonanssitaajuudet sattumanvaraisia vai samat myös myöhemmin samalla sävelkorkeudella ja vokaalilla tuotetussa äännössä. Sävelet tehtävään neljä valittiin rekisterirajan yläpuolelta ja ne olivat vokaalilla [ʌ:] G#4 ja A4, vokaalilla [ɛ:] G#4 ja A4 ja vokaalilla [i:] G4 ja A4.

3.4 Analyysit

Jokaisen koehenkilön kaikki ääntötehtävät tallennettiin omaksi wav-tiedostokseen käyttäen 44100 Hz:n näytteenottotaajuutta ja 16 bitin bittisyvyyttä. Tiedostoista poistettiin ylimääräinen materiaali käyttäen Cubase 7.5 tietokoneohjelmaa, jonka jälkeen jäljelle jäävästä materiaalista tallennettiin uusi wav-tiedosto, jonka toiseen kanavaan tallennettiin akustinen signaali ja toiseen EGG-signaali. Tämän jälkeen tiedostojen sisältämille näytteille suoritettiin Praat-tietokoneohjelmalla osa analysoinneista. Praatilla muodostettiin spektrikuvat koehenkilöiden laulamien sanojen keskeltä sellaisesta kohdasta, jossa vokaaliääntö havaittiin tasaiseksi. Spektri tuotettiin 250 millisekunnin pituisesta aikajaksosta käyttäen Gaussin ikkunointia. EGG-signaalin vastaavasta kohdasta leikattiin myös 250 ms – 300 ms pitkä kaistale, joka tallennettiin erilliseksi wav-tiedostoksi myöhemmin suoritettavia EGG-analyysejä varten. Spektreistä analysoitiin visuaalisesti kuuden matalimman osasävelen äänenpainetaso ja kuudennen osasävelen yläpuolisen voimakkaimman osasävelen äänenpainetaso. Äänenpainetasot laskettiin käyttäen vertailukohtana tallennettua kalibrointisignaalia.

EGG-signaalit analysoitiin Matlab R2013A -tietokoneohjelmalla käyttäen Dong Liun (2012) kehittämää koodia, jota on aiemmin käyttänyt tutkimuksessaan Kankare, Liu, Laukkanen ja Geneid (2012). Koodi laskee näytteestä keskiarvot useille EGG-parametreille. Kontaktiosamäärälle (CQ) koodi laskee arvon kuudella eri menetelmällä mukaan lukien derivaattamenetelmän ja muut aiemmin elektrolottografiaa käsittelevässä luvussa esitellyt menetelmät. CQ:n lisäksi keskiarvo saadaan myös amplitudinormalisoidun EGG-signaalin ensimmäisen derivaatan maksimille (MDEGG, maximum of the first time derivative of the amplitude normalized EGG), normalisoidulle amplitudiosamäärälle (NAQ, normalized amplitude quotient) sekä EGG-signaalin huipusta laaksoon amplitudille (peak to peak amplitude). Tulosten tarkastelussa käytettiin CQ-arvoa, joka määritettiin asettamalla äänihuulikontaktin alku- ja loppuhetkiksi ajan hetket, joina signaali ylitti 25 % signaalin maksiamplitudista.

3.5 Resonanssitaktiikoiden ja resonanssien taajuuksien arviointi

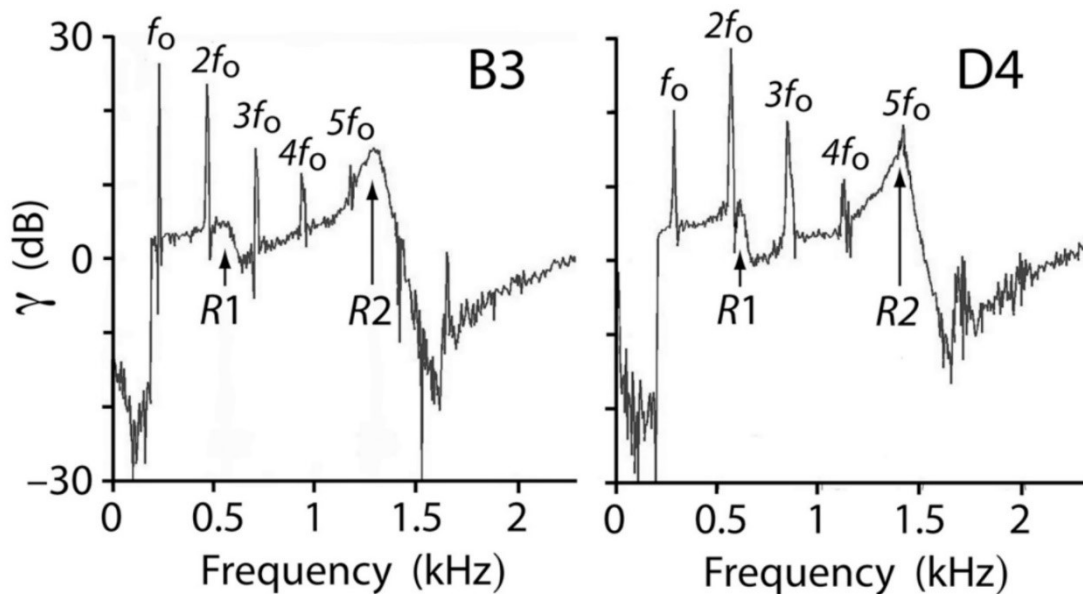
Resonanssitaktiikoita arvioitaessa oletettiin, että resonanssin merkitys on äänentuotossa suuri silloin, kun äänen osasävelet voimistuvat runsaasti resonanssien tuntumassa tai vaihtoehtoisesti niiden alapuolella epälineaarisen lähde-suodin teorian mukaisesti. Jos näytteissä resonanssitaajuudet muuttuivat sävelkorkeuden muuttuessa, katsottiin laulajan äänenmuodostuksen nojaavan ainakin jossain määrin resonanssien vaikutukselle ja hänen pyrkivän säilyttämään kyseisen vaikutuksen myös sävelkorkeuden muuttuessa. Resonansseilla ei katsottu olevan äänentuotossa yhtä suurta merkitystä, jos ne pysyivät pääasiallisesti paikoillaan sävelkorkeuden muuttuessa. Tällöin resonanssien merkityksen arvioitiin liittyvän pääasiassa vokaalisävyyn tuottamiseen. Tässä tutkimuksessa resonanssitaktiikoita analysoitiin vertaamalla osasävelten välisiä voimakkuuseroja sekä arvioimalla spektreissä näkyvän hälyn muotoa.

3.5.1 Osasävelten väliset voimakkuuserot

Ääntöväylän resonanssien taajuuksia arvioitiin spektreistä osasävelten välisten voimakkuuserojen perusteella. Osasävelten voimakkuuserot voivat antaa vihjeitä resonanssien sijainneista sillä osasävel, joka osuu jonkin resonanssin kanssa samalle taajuudelle, on yleensä voimakkaampi kuin sitä ympäröivät osasävelet. Kuviossa 3 on havainnollistettu, mikä vaikutus on resonanssin osumisella samalle taajuudelle osasävelen kanssa. Kuvio 3 on peräisin Henrichin ym. (2011) tutkimuksesta. Siinä on esitetty klassisen naislaulajan (altto) laulaman kahden sävelen B3 (247) ja D4 (294) spektrit sekä akustisella herätteellä mitatut äännön aikaiset ääntöväylän vasteet. Analysoidut äänneet oli poimittu laulajan laulamasta englanninkielien sanasta "heard". Korkeammalla sävelellä D4 resonanssit R1 ja R2 osuivat osasävelten H2 (kuviossa 2Fo) ja H5 (kuviossa 5Fo) kohdalle toisin kuin matalammalla sävelellä B3, jolla resonanssit sijoittuivat osasävelten H2 ja H3 sekä H5 ja H6 väliin. Kuvioista 3 on nähtävissä, että kun resonanssi osuu osasävelen kohdalle, voi osasävel olla selvästi (kuvion 3 laulajalla n. 8 dB) voimakkaampi kuin sitä ympäröivät osasävelet.

Tässä tutkimuksessa tulkittiin osasävelen olevan jonkin ääntöväylän resonanssin läheisyydessä silloin kun se oli sitä ympäröiviä osasäveliä selvästi (n. 8 dB) voimakkaampi. Jos sama osasävel säilytti suhteellisen voimakkuutensa sävelkorkeuden muuttuessa, laulaja todennäköisesti muutti resonanssin taajuutta osasävelen mukana säilyttääkseen vahvistuksen kyseisellä osasävelellä. Tällaisessa tilanteessa laulajalla arvioitiin olevan käytössä resonanssitaktiikka. Resonanssilla ei katsottu olevan yhtä suurta merkitystä laulajan äänentuoton kannalta, jos spektrissä näkyvä huippu

näytti syntyvän aina samalle taajuudella laulettua sävelkorkeudesta riippumatta. Tällaisessa tilanteessa resonanssin katsottiin pysyvän paikoillaan ja vahvistavan aina kulloinkin sen kanssa samalle taajuudelle osasäveltä.

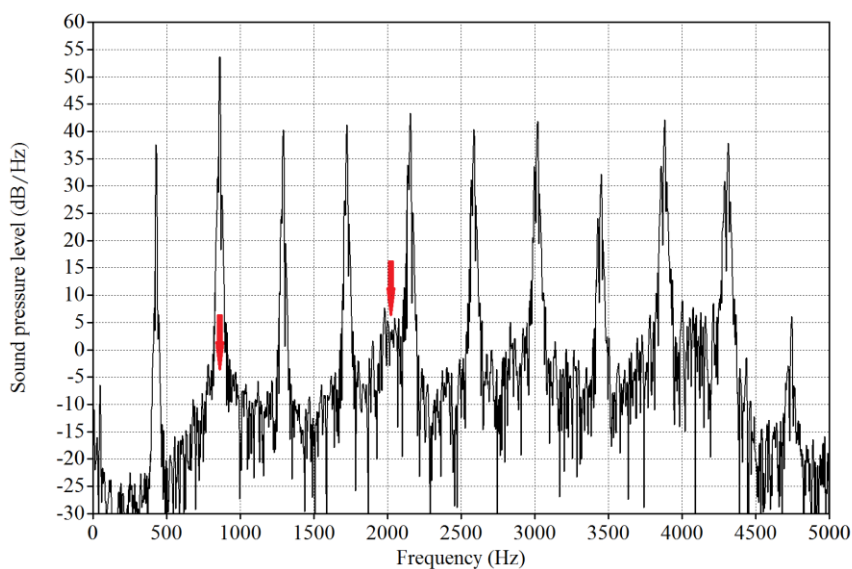


KUVIO 3. Resonanssin vaikutus sen kohdalle osuvaan osasäveleen. (Henrich ym., 2011)

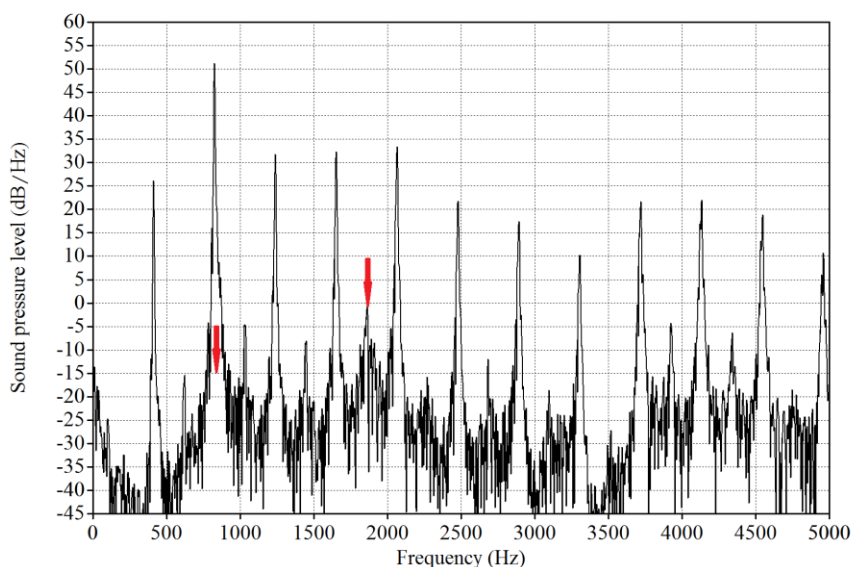
3.5.2 Spektrissä näkyvä häly

Resonanssitaktiikoiden ja resonanssien taajuuksien arvioinnissa käytettiin apuna spektreissä näkyvää hälyä. Resonanssin hälyssä aiheuttama korostuma saattaa antaa viitteitä resonanssien taajuuksista varsinkin osasävelten välisillä alueilla. Tämän tutkimuksen tekijän lisäksi kaikki ääninäytteistä tehdyt spektrit arvioi toinen vokologi, jotta tulosten merkittävyyttä voitaisiin paremmin tarkastella. Arvioijat merkitsivät lomakkeeseen niiden osasävelten numerot, joita lähimpänä kahden matalimman resonanssin taajuudet olivat. Tämän lisäksi he arvioivat asteikolla $(-3) - 3$, kuinka lähellä osasäveltä resonanssitaajuus oli. Jos etäisyys arvioitiin luvuksi 0, resonanssi oli aivan osasävelen kohdalla. Jos etäisyys arvioitiin luvuksi 3 tai (-3) , resonanssi oli keskellä kahden osasävelen välistä aluetta joko läheisimmän osasävelen ylä- tai alapuolella. Arvioijien antamat arviot osasävelten ja resonanssien välisistä etäisyyksistä muunnettiin myös hertseiksi (Hz) käyttämällä kaavaa: etäisyys hertseinä = $H1 \times (\text{arvioitu etäisyys} / 6)$. Tällöin, jos resonanssin on arvioitu olevan kuudennen osasävelen alapuolella arvolla -2 perustaajuuden ollessa 300 Hz, on resonanssin ja osasävelen etäisyys $300 \text{ Hz} \times (-2 / 6) = -100 \text{ Hz}$. Resonanssi sijaitsee tällöin 100Hz sitä lähimpänä olevan osasävelen alapuolella.

Spektrikuvien tulkittavuus vaihteli eri vokaalien ja koehenkilöiden välillä. Useissa spektreissä osasävelten välisillä alueilla oli havaittavissa ylimääräisiä subharmonisia osasäveliä muistuttavia piikkejä, jotka sijoittuivat aina keskelle osasävelvälejä. Niiden alkuperää ei pystytty täysin selvittämään. Subharmonisten osasävelten lisäksi kyseessä saattoi olla myös jokin mittauslaitteistoon tai sähköihin liittyvä häiriötekijä. Sellaisen todennäköisyyttä pienentää kuitenkin se, että samassa tilassa samaan aikaan tallennetuista kahdesta koehenkilöstä toisen näytteissä oli kaikista koehenkilöistä runsaimmin piikkejä (13 näytteessä) kun taas toisen koehenkilön näytteissä vähiten (3 näytteessä). Yhteensä kaikista 135 spektristä 35:ssä oli nähtävissä selvästi erottuvat piikit. Osassa spektreistä piikit olivat huomattavan selviä (ks. kuvio 5) kun taas osassa ne erottuivat vain juuri ja juuri spektrissä näkyvästä hälystä. Näytteet, joiden spektreissä piikkejä näkyi, eivät kuulostaneet epänormaaleilta eikä niissä ollut havaittavissa minkäänlaista subharmonisiin osasäveliin liitettävää piirrettä kuten rohinaa. Piikit hankaloittivat kuitenkin paikoin resonanssien arviointia, koska ne saattoi helposti sekoittaa resonanssitaajuuden hälyssä aiheuttamaksi huipuksi. Arvioijat pyrkivät ottamaan tämän ilmiön tarkastelussaan huomioon. Kuviossa 4 on esimerkki spektristä, jossa resonanssien taajuudet ovat kohtalaisen helposti arvioitavissa. Kuvion 5 spektrissä osasävelväleissä esiintyvät piikit hankaloittavat jossain määrin arviointia. Molemmissa kuvioissa punaiset nuolet osoittavat mille taajuudelle resonanssien R1 ja R2 on arvioitu sijoittuvan.



KUVIO 4. Koehenkilön 3 sävelellä A4 (n. 440 Hz) laulaman vokaalin [ε:] spektri. Punaiset nuolet kuvastavat kahden matalimman resonanssin arvioituja sijainteja. Ensimmäinen resonanssi (R1) on arvioitu aivan toisen osasävelen kohdalle. Toinen resonanssi on arvioitu viidennen osasävelen alapuolelle arvolla -2 (arvo 0 = osasävelen kohdalla, arvo -3 = kahden osasävelen välissä).



KUVIO 5. Koehenkilön 1 sävellä G#4 (n. 415 Hz) laulaman vokaalin [ε:] spektri. Punaiset nuolet kuvastavat kahden matalimman resonanssin arvioituja sijainteja. Ensimmäinen resonanssi (R1) on arvioitu aivan toisen osasävelen kohdalle. Toinen resonanssi on arvioitu neljännen ja viidennen osasävelen välille arvolla -3 (arvo 0 = osasävelen kohdalla, arvo -3 = kahden osasävelen välissä).

3.6 Resonanssien virityksen ja äänilähteen välisen vuorovaikutuksen tutkiminen

Kahden matalimman resonanssin ja niitä lähimpänä olevien osasävelten etäisyyksistä muodostettiin kolme muuttujaa, jotka kuvastavat sitä kuinka lähelle osasäveliä resonanssit virittyivät. Muodostetut muuttujat olivat:

1. **R1 viritys** = ensimmäisen resonanssin ja sitä lähimpänä olevan osasävelen etäisyys, joka laskettiin jokaiselle äännölle molempien arvioijien antamien arvioiden itseisarvojen keskiarvona.
2. **R2 viritys** = toisen resonanssin ja sitä lähimpänä olevan osasävelen etäisyys, joka laskettiin jokaiselle äännölle molempien arvioijien antamien arvioiden itseisarvojen keskiarvona.
3. **R1-R2 viritys** = R1 etäisyyden ja R2 etäisyyden keskiarvo, joka laskettiin kahden matalimman resonanssin yhteisvaikutuksen tutkimiseksi.

Koehenkilöiden välisiä eroja tutkittiin näiden kolmen muuttujan kohdalla varianssianalyysillä. Tarkoituksena oli saada informaatiota siitä kuinka paljon toisiinsa verrattuna koehenkilöt nojasivat resonanssin vaikutukseen voimakkaiden korkeiden sävelten tuotossa. Resonanssin mahdollisia vaikutuksia äänilähteeseen pyrittiin selvittämään tutkimalla muuttujien ja eri EGG-parametrien välisiä yhteyksiä korrelaatioanalyysillä. Käytetty korrelaatiokerroin oli kaikkien normaalijakautuneiden muuttujien kohdalla Pearsonin korrelaatiokerroin ja kaikkien normaalijakautumattomien muuttujien kohdalla Spearman's rho. Kaikissa tilastomenetelmissä käytettiin IBM SPSS 20 tilasto-ohjelmaa.

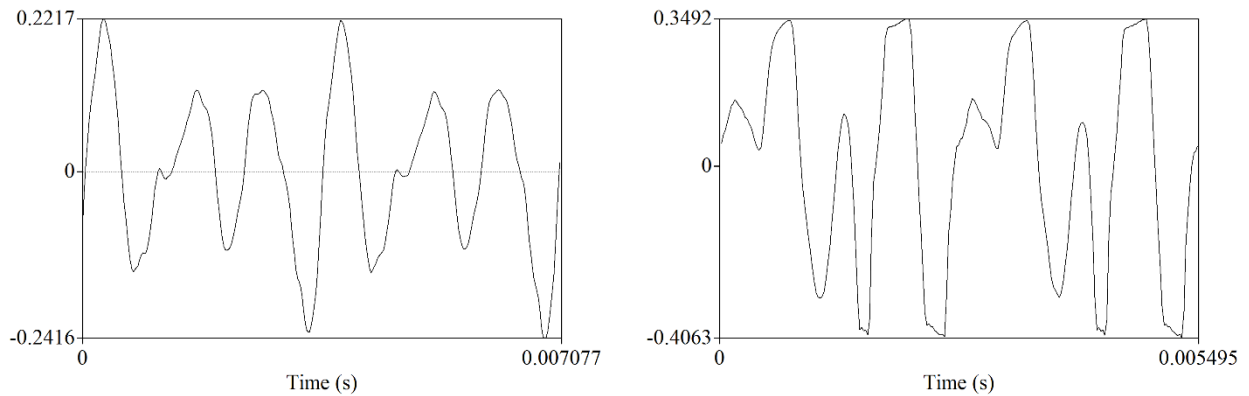
3.7 Akustisen signaalin yliohtautumisen vaikutuksen arvioiminen

Koehenkilön 2 akustisen signaalin havaittiin analyysiä tehdessä yliohtautuneen. Kuviossa 6 on vasemmalla puolella esitetty koehenkilön 2 yliohtautumaton signaali sävelellä D4. Saman kuvion oikealla puolella on hänen sävelellä F#4 laulamansa näytteen runsaasti yliohtautunut signaali. Molemmat näytteet on laulettu vokaalilla [Λ:]. Yliohtautuneen signaalin äänenpainetasoksi mitattiin (104 dB), joka oli suurin koehenkilöltä 2 mitattu äänenpainetaso. Kyseisessä signaalissa on selvästi nähtävissä positiivisten ja negatiivisten huippujen poisleikkaantuminen. Kuvioista 6 saa myös hyvän kuvan siitä kuinka huomattavasti koehenkilöllä 2 signaali yliohtautui pahimmillaan.

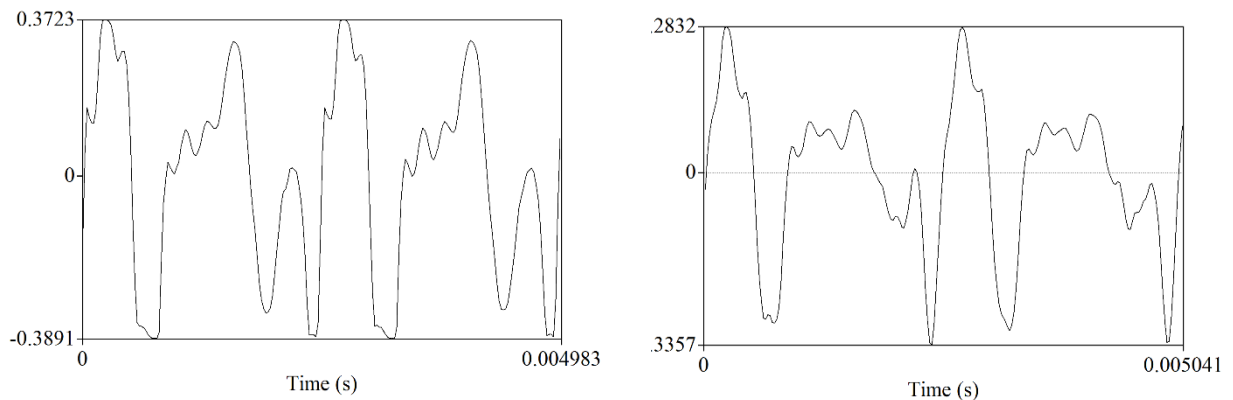
Kuviossa 7 on esitetty kaksi signaalinosaa, joista vasemmanpuoleinen on koehenkilön 2 laulaman näytteen alkupuolelta ja oikeanpuoleinen saman näytteen loppupuolelta. Näyte on laulettu sävelellä G#4 ja vokaalilla [Λ:]. Äännön alkupuolella signaalin yliohtautuminen sai aikaan huippujen poisleikkaantumista. Loppupuolella äänenpainetason ollessa matalampi huiput säilyivät suhteellisen normaaleina. Suurimmasta osasta koehenkilön 2 näytteistä pystyttiin valitsemaan analyysiin sellainen ajanjakso, jossa yliohtautuneisuutta ei ollut ollenkaan tai ainoastaan hieman havaittavissa.

Aldrichin (2004) mukaan yliohtautuessaan signaali alkaa muistuttaa asteittain kanttiaaltoja. Myös sen spektri saa kanttiaallon spektrille ominaisia piirteitä eli siinä kaikki parittomat osasävelet vahvistuvat. Digitaalisen signaalin kohdalla spektriin syntyy myös aliasoitumisen (laskostumisen) myötä niin sanottuja epäharmoonisia yläsäveliä. (Aldrich, 2004, 134 - 135). Yliohtautumisen vaikutusta koehenkilön 2 spektreihin pyrittiin vielä selvittämään tarkemmin ylimääräisellä kokeella, jossa yksi hänen hyvälaatuinen ääninäytteensä (sävel G4, vokaali [i:]) äänitettiin uudelleen MOTU-äänikortin kautta tietokoneelle Cubase-ohjelmalla. Alkuperäinen näyte toistettiin kymmenen kertaa Cubasella siten, että signaali kulki yhdestä Motun ulostuloista takaisin yhteen Motun sisääntuloista. Sisääntulon taso säädettiin niin, että ensimmäisellä tallennuskerralla signaali tallentui ylittämättä

Motun maksimisignaalitasoa. Muilla tallennuskerroilla signaalin huippuarvo säädettiin ylittämän maksimisignaalitaso 2 - 10 desibelillä. Kokeen tulokset on raportoitu tutkimuksen tulosluvussa.



KUVIO 6. Vasemmalla puolella koehenkilön 2 [a:]-vokaalilla laulaman D4 sävelen yliohtautumaton signaali. Oikealla puolella koehenkilön 2 [a:]-vokaalilla voimakkaaimmin (SPL=104 dB) laulaman F#4 sävelen runsaasti yliohtautunut signaali.



KUVIO 7. Samasta näytteestä (vokaali [a:], sävel G#4) otetut kaksi signaalin eri kohtaa. vasemmanpuoleisessa sekä negatiiviset että positiiviset huiput ovat jossain määrin leikkaantuneet. Oikeanpuoleisessa kuvassa ei ole havaittavissa yliohtautumista.

4 TULOKSET

4.1 Resonanssien arviointi ja resonanssitaktiikat

Jokaisen laulettu näytteen resonanssitaajuuksia arvioitiin tarkastelemalla osasävelten välisiä voimakkuussuhteita ja analysoimalla visuaalisesti näytteiden spektreissä näkyvää hälyä. Kahden arvioijan visuaaliset arviot resonanssien taajuuksista poikkesivat toisistaan yhdentoista spektrin kohdalla vähintään kahdella mittayksiköllä joko toisen resonanssin tai molempien resonanssien kohdalla. Nämä spektrit muodostettiin uudelleen käyttäen 250 millisekunnin ajanjakson sijaan mahdollisimman suuri osa vokaalin siitä osuudesta, jossa ääntö oli tasaista. Pidemmästä ajanjaksosta tuotetuissa spektreissä hälyn muoto vaikutti olevan selvemmin tulkittavissa. Kun spektrikuvat oli muodostettu uudelleen, vain kahden näytteen kohdalla arvioijien antamat arviot poikkesivat toisistaan enintään kahdella mittayksiköllä.

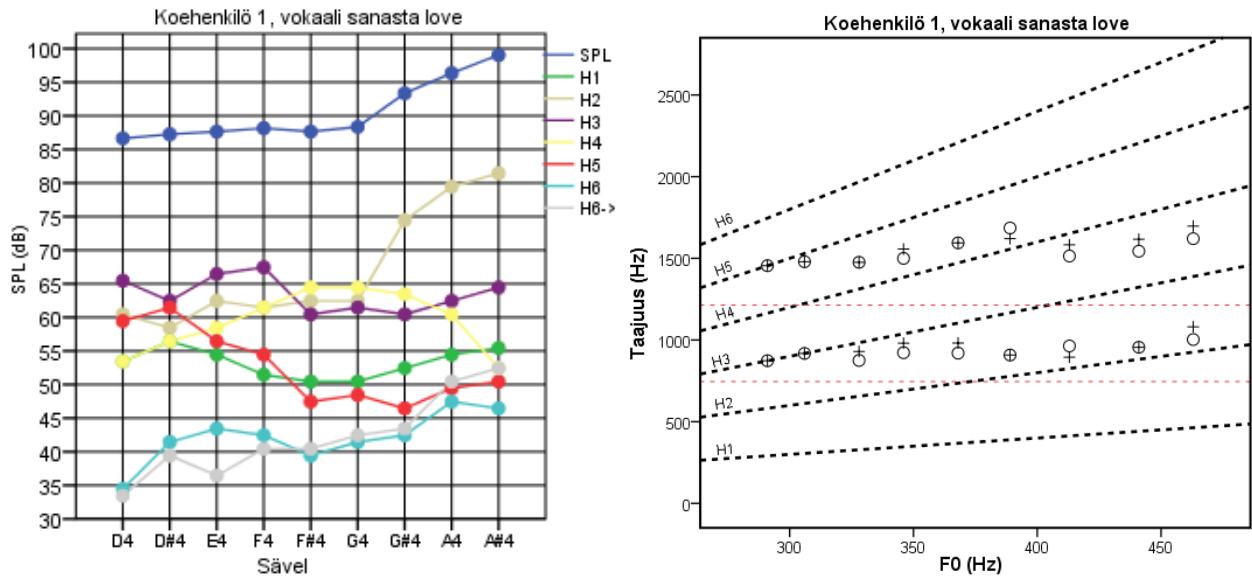
Kuvioissa 8 – 21 (pois lukien kuviot 12 ja 13) on esitetty vasemmalla puolella kuuden matalimman osasävelen äänenpainetaso sävelkohtaisesti. Kuvioihin on merkitty myös jokaisen äännön kokonaisäänepainetaso (SPL) sekä kuudennen osasävelen yläpuolisen alueen voimakkaimman osasävelen äänenpainetaso. Kuvioissa oikealla puolella on esitetty kahden matalimman resonanssin taajuudet suhteessa osasävelten taajuuksiin. Toisen arvioijan arviot on merkitty ristillä ja toisen ympyrällä. Punaiset katkoviivat osoittavat kahden matalimman resonanssin taajuuksia äännössä, jonka koehenkilö on tuottanut luonnolliselta puhekorkeudelta.

4.1.1 Vokaali [ʌ:] sanasta love

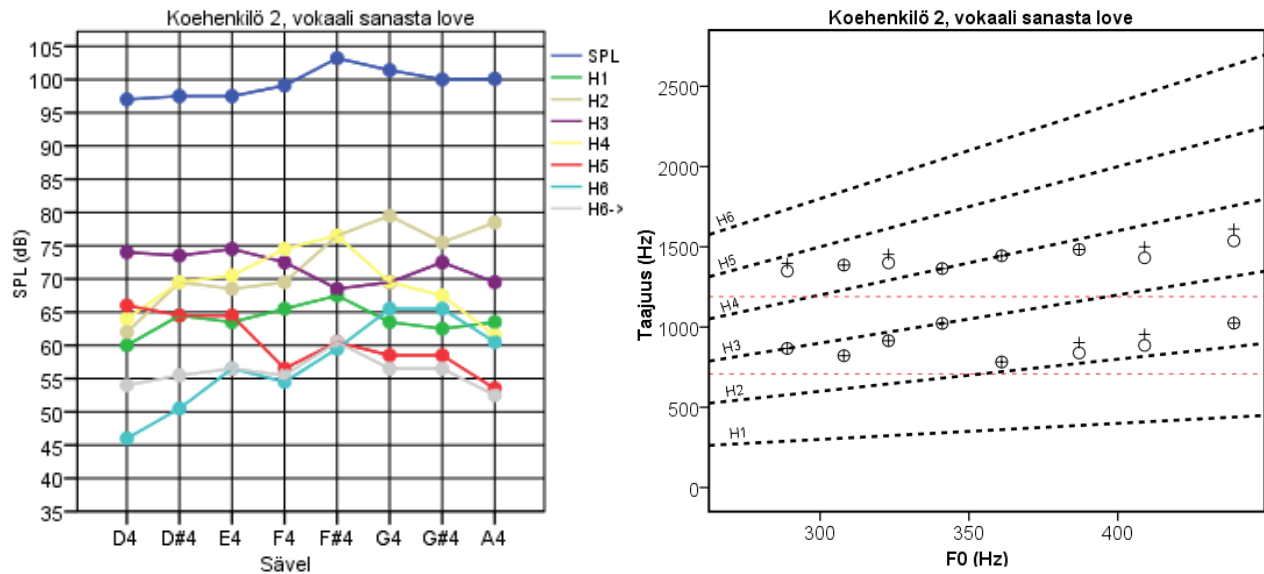
Kuvioissa 8 – 11 on näkyvissä vokaalia [ʌ:] koskeva data. Neljälle koehenkilönä toimineelle laulajalle ei ollut havaittavissa yhteistä identtistä resonanssitaktiikkaa. Kaikkien koehenkilöiden välillä yhtenevä piirre oli kuitenkin se, että molemmat tai jompikumpi resonansseista joillain sävelalueilla nousi sävelkorkeuden noustessa säilyttäen suurin piirtein etäisyytensä lähimpään osasäveleen. Kuvioista on havaittavissa, että joissain tapauksissa resonanssi nousi tasaisesti ylöspäin sävelkorkeuden noustessa, kunnes jollain sävelkorkeudella laskeutui äkillisesti matalammalle taajuudelle, jonka jälkeen jatkoi uudelleen tasaista nousua sävelkorkeuden noustessa. Tästä oli selvin esimerkki koehenkilöllä 2, jolla ensimmäinen resonanssi R1 laskeutui kolmannen osasävelen H3

tuntumasta toisen osasävelen H2 tuntumaan sävelkorkeuden noustessa sävelellä F#4. Sama tapahtui koehenkilöllä 1, jolla toinen resonanssi pysytteli H4:n yläpuolella aina sävelelle G4 asti, jonka jälkeen putosi H4:n alapuolelle ja jatkoi uudelleen nousua ikään kuin vältellen joutumista suoraan H4 kohdalle. Kaikilla koehenkilöillä resonanssit olivat pääasiallisesti aina suuremmilla taajuuksilla kuin puhutussa vokaalissa.

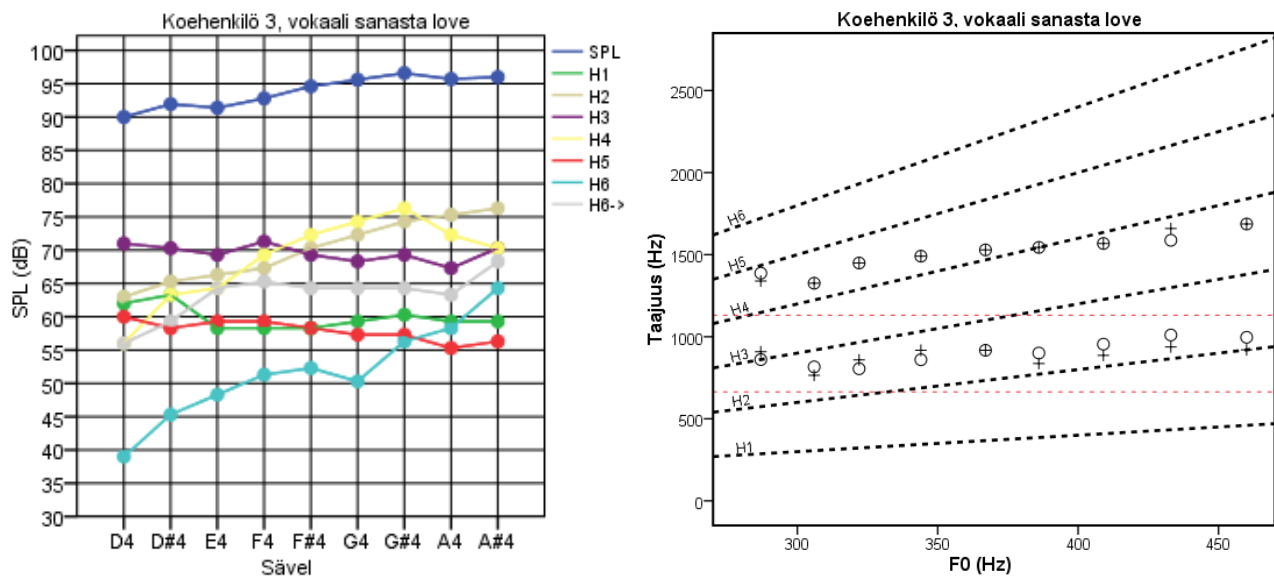
Koehenkilöillä 1 – 3 kolmas osasävel oli spektrissä hallitsevin komponentti matalimmilla sävelillä suurpiirteisesti sävelvälillä D#4 – F(#)4. Tästä korkeammilla sävelillä spektrin hallitseviksi komponenteiksi heillä vaihtui toinen, neljäs tai näistä molemmat osasävelet. Tämä energian jakautumisen muutos tapahtui juuri sillä sävelalueella, jolle miesten rekisterivaihdoskohta tyypillisesti sijoittuu. Koehenkilöllä 4 spektrien energian jakautuminen vaikutti olevan hieman muista koehenkilöistä poikkeavaa. Hänellä hypoteettisen rekisterirajan (E4 – F#4) alapuolella toinen ja neljäs osasävel olivat jo valmiiksi kohtuullisen voimakkaita. Rekisterirajan yli mentäessä neljäs osasävel menetti voimakkuuttaan toisen ja kolmannen osasävelen siirtyessä hallitsemaan spektriä. On mahdollista, että ensimmäinen ja toinen resonanssi siirtyivät hieman lähemmäksi toisiaan vahvistamaan yhdessä suurempaa taajuusaluetta, jonka kohdalle osui toisen osasävelen lisäksi myös kolmas osasävel. Toinen mahdollisuus on, että ensimmäisen resonanssin kaistanleveys olisi kasvanut. Näiden vaihtoehtojen todennäköisyyttä voidaan arvioida tarkastelemalla kuvioita 12 ja 13, joissa on esitetty koehenkilön 4 [Λ:] -vokaalilla laulaman kahden sävelen spektrit. Tarkasteltaessa spektreissä näkyvän hälyn muotoa nähdään, että rekisterirajan alapuolisella sävelellä D4 (294 Hz) on havaittavissa kaksi selkeää erillistä korostumaa, joista ensimmäinen osuu H2:n ja H3:n väliin ja toinen H4:n yläpuolelle kun taas rekisterirajan yläpuolisella korkealla sävelellä A4 (440 Hz) näkyy yksi suurempi korostuma, joka ulottuu H3:n molemmille puolille. Tämä antaa viitteitä siitä, että R1:n kaistanleveys ei olisi niinkään kasvanut vaan että R1 ja R2 olisivat siirtyneet hieman lähemmäksi toisiaan.



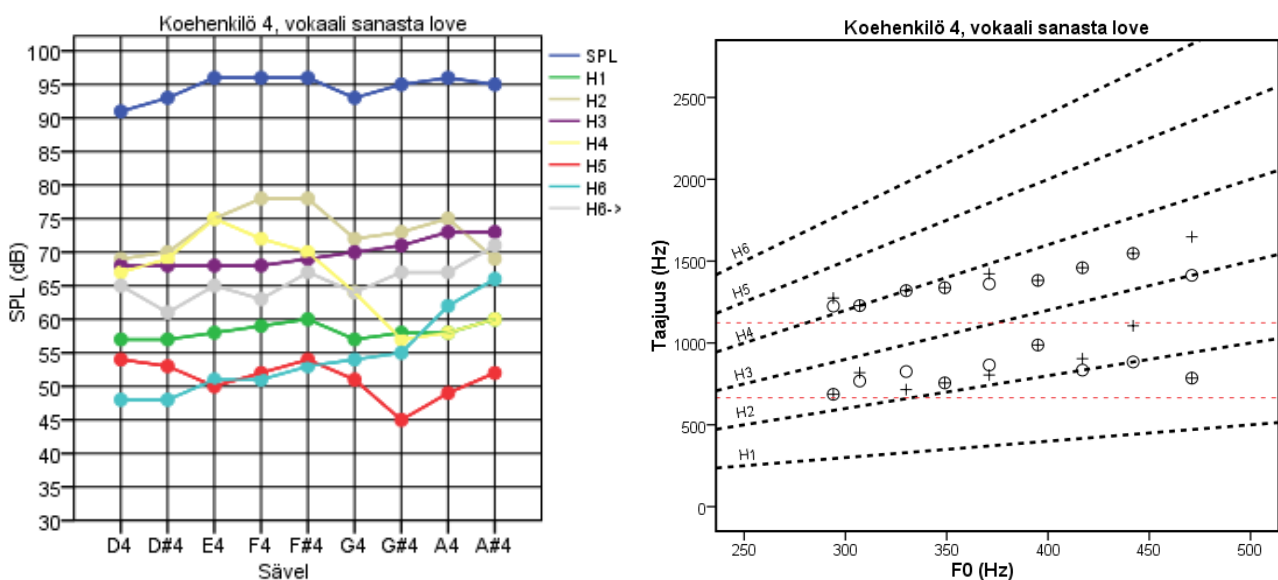
KUVIO 8. Vasemmanpuoleisessa kuvassa on esitetty koehenkilön 1 vokaalilla [ʌ:] laulamien näytteiden osasävelten suhteelliset voimakkuudet sävelkohtaisesti. Oikeanpuoleisessa kuvassa on esitetty kahden arvioijan arviot resonanssien taajuuksista perustaajuuden suhteen. Mustat katkoviivat kuvastavat kuuden matalimman osasävelen taajuutta. Punaiset katkoviivat osoittavat koehenkilön puhuman vokaalin R1:n ja R2:n taajuudet.



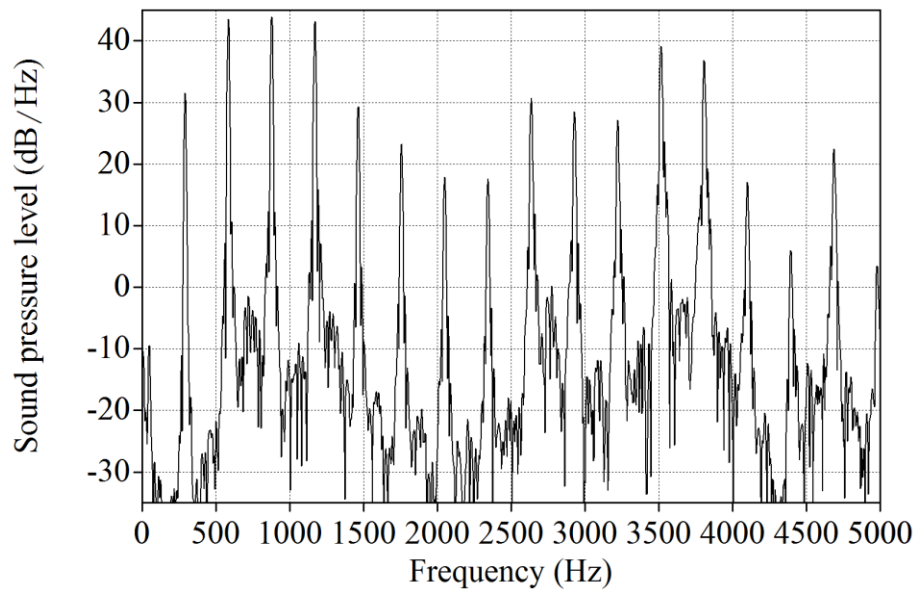
KUVIO 9. Vasemmanpuoleisessa kuvassa on esitetty koehenkilön 2 vokaalilla [ʌ:] laulamien näytteiden osasävelten suhteelliset voimakkuudet sävelkohtaisesti. Oikeanpuoleisessa kuvassa on esitetty kahden arvioijan arviot resonanssien taajuuksista perustaajuuden suhteen. Mustat katkoviivat kuvastavat kuuden matalimman osasävelen taajuutta. Punaiset katkoviivat osoittavat koehenkilön puhuman vokaalin R1:n ja R2:n taajuudet.



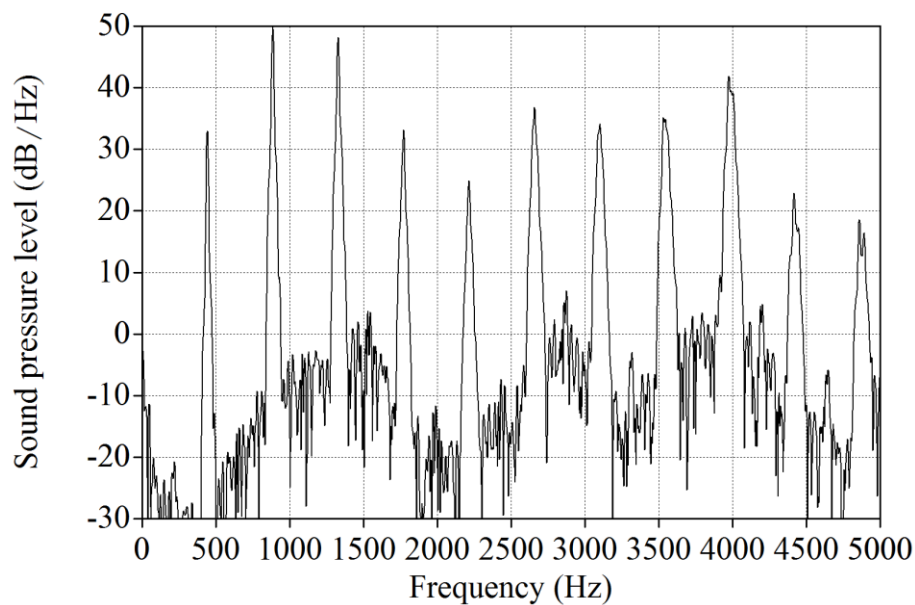
KUVIO 10. Vasemmanpuoleisessa kuvassa on esitetty koehenkilön 3 vokaalilla [ʌ:] laulamien näytteiden osasävelten suhteelliset voimakkuudet sävelkohtaisesti. Oikeanpuoleisessa kuvassa on esitetty kahden arvioijan arviot resonanssien taajuuksista perustaajuuden suhteen. Mustat katkoviivat kuvastavat kuuden matalimman osasävelen taajuutta. Punaiset katkoviivat osoittavat koehenkilön puhuman vokaalin R1:n ja R2:n taajuudet.



KUVIO 11. Vasemmanpuoleisessa kuvassa on esitetty koehenkilön 4 vokaalilla [ʌ:] laulamien näytteiden osasävelten suhteelliset voimakkuudet sävelkohtaisesti. Oikeanpuoleisessa kuvassa on esitetty kahden arvioijan arviot resonanssien taajuuksista perustaajuuden suhteen. Mustat katkoviivat kuvastavat kuuden matalimman osasävelen taajuutta. Punaiset katkoviivat osoittavat koehenkilön puhuman vokaalin R1:n ja R2:n taajuudet.



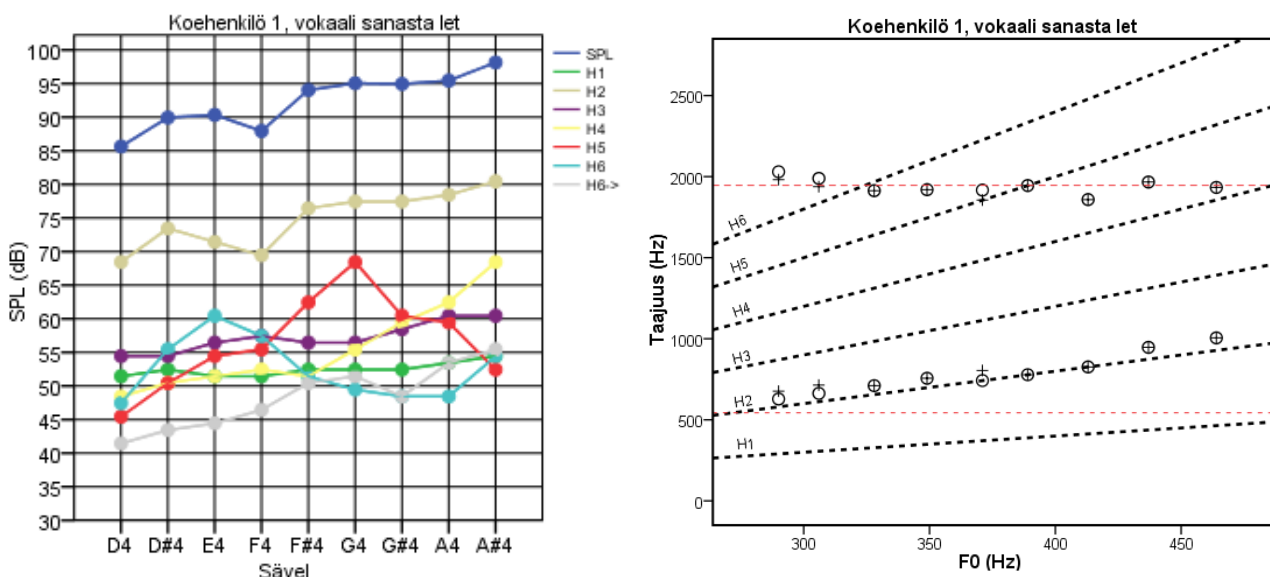
KUVIO 12. Koehenkilön 4 sävelellä D4 (n. 294 Hz) laulaman [ʌ:] -vokaalin spektri. Hälyssä on nähtävissä kaksi erillistä huippua R1:n ja R2:n aikaansaamina taajuusvälillä 500 Hz – 1500 Hz.



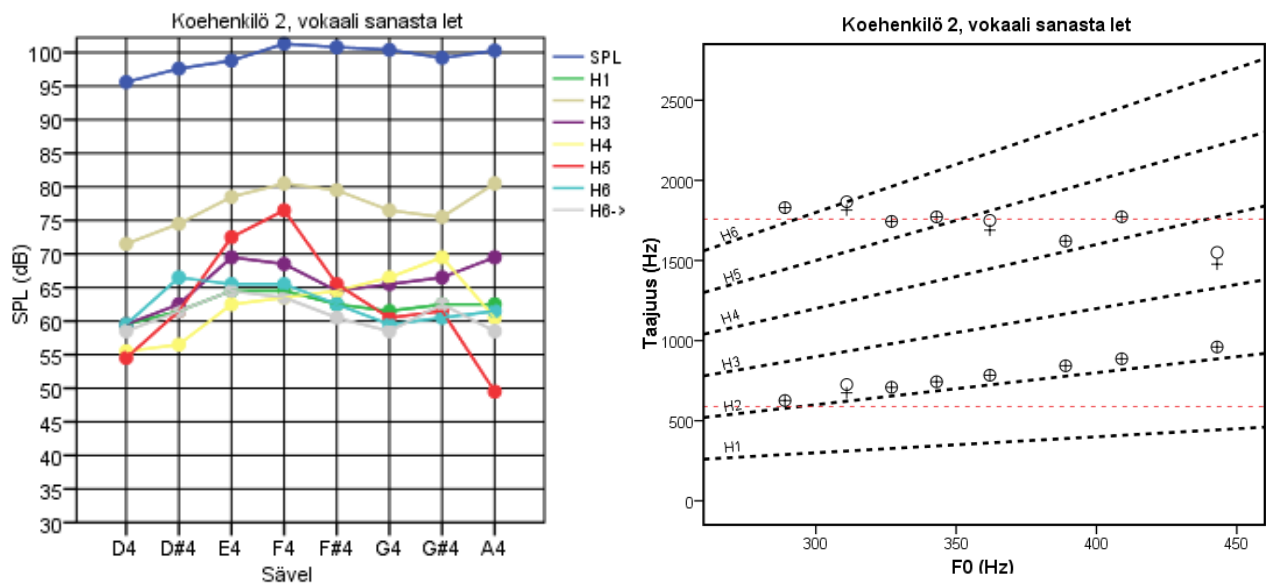
KUVIO 13. Koehenkilön 4 sävelellä A4 (440 Hz) laulaman [ʌ:] -vokaalin spektri. Hälyssä on nähtävissä yksi voimakas huippu todennäköisesti R1:n ja R2:n aikaansaamana taajuusvälillä 750 Hz – 1750 Hz.

4.1.2 Vokaali [ɛ:] sanasta let

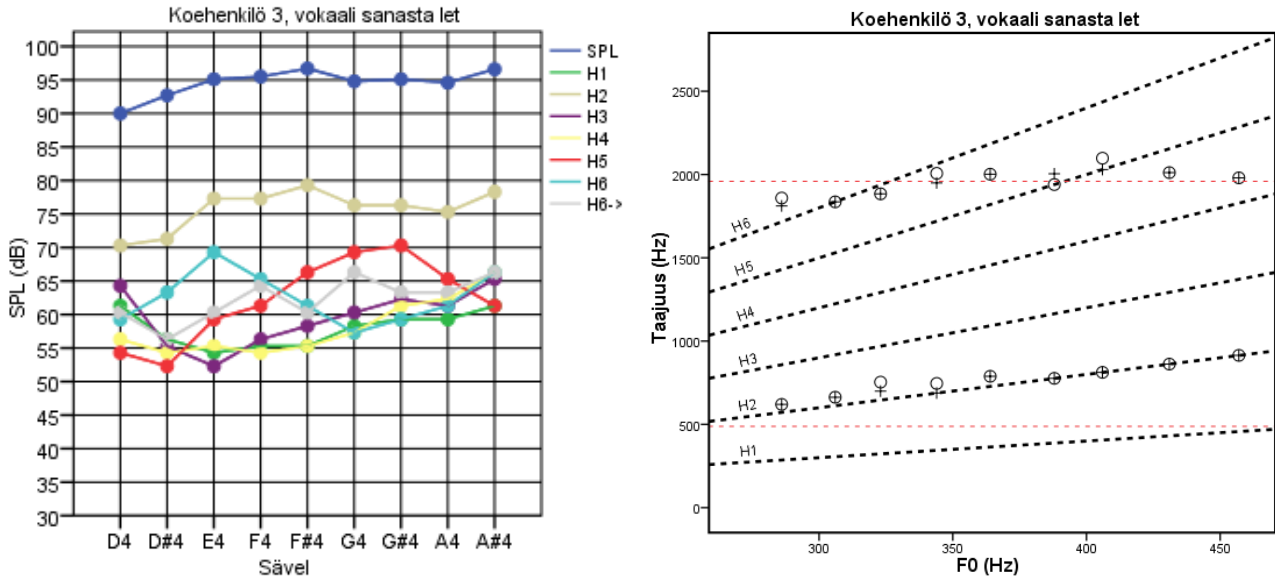
Vokaalilla [ɛ:] laulajien välinen yhtenevä piirre oli R1:n virittyminen H2:n tuntumaan melkein kaikilla sävelkorkeuksilla. Resonanssin arvioitiin osuvan lähes aina juuri H2:n yläpuolelle tai kohdalle, ja vain koehenkilön neljä laulaman korkeimman sävelen kohdalla osasävelen alapuolelle. Kuvioista 14 – 17 on nähtävissä, että toinen osasävel oli spektreissä lähes poikkeuksetta 15 – 25 dB voimakkaampi kuin perustaajuus ollen kaikilla laulajilla jokaisessa äännessä spektrin voimakkain komponentti. Kaikilla laulajilla R2 pysytteli lähellä puheäänölle ominaista taajuutta punaisen katkoviivan tuntumassa vahvistaen niitä osasäveliä jotka kulloinkin osuivat sen läheisyyteen. Koehenkilöllä 2 R2 laski hieman sävelkorkeuden noustessa, mikä saattoi olla seurausta artikulaatioelimistön säätämisestä, joka vaaditaan R1:n taajuuden nostamiseen. R1:n taajuus nousee suuta avattaessa samoin kuin yleensä R2:n taajuus, mutta vokaalin [ɛ:] sävy muuttuu tällöin kuitenkin tyypillisesti äänteiden [æ:] ja [ʌ:] suuntaan, joilla R2:n taajuus on matalammalla kuin vokaalissa [ɛ:]. Koehenkilön 2 ääninäytteistä oli korkeimmilla sävelillä kuultavissa vokaalisävyen muuntumista äänten [æ:] suuntaan.



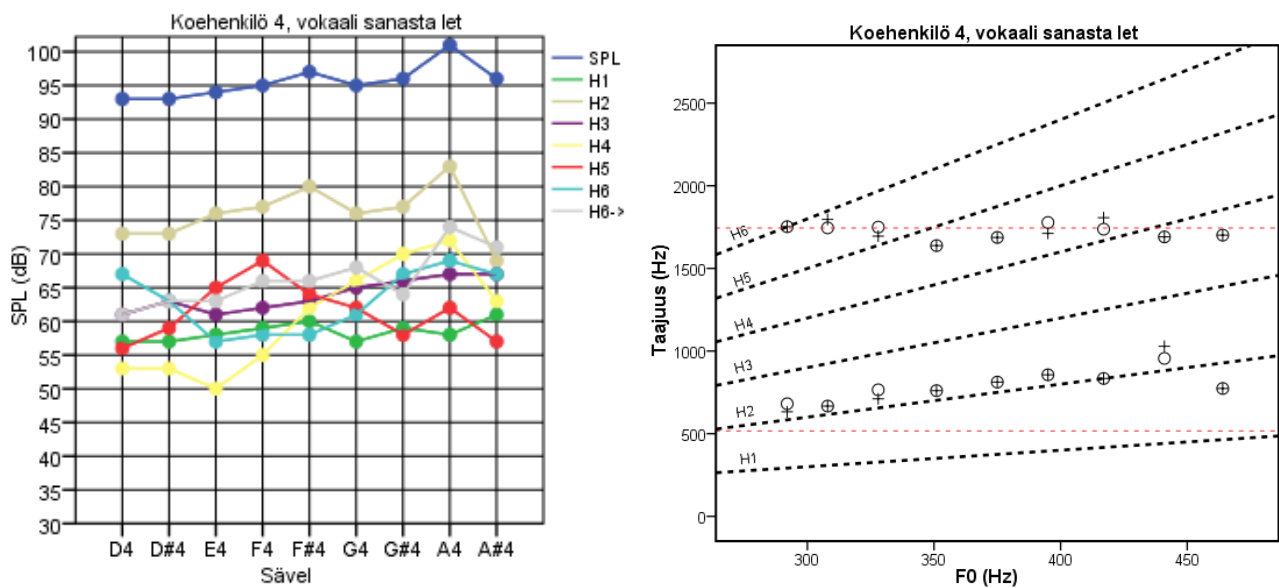
KUVIO 14. Vasemmanpuoleisessa kuvassa on esitetty koehenkilön 1 vokaalilla [ɛ:] laulamien näytteiden osasävelten suhteelliset voimakkuudet sävelkohtaisesti. Oikeanpuoleisessa kuvassa on esitetty kahden arvioijan arviot resonanssien taajuuksista perustaajuuden suhteen. Mustat katkoviivat kuvastavat kuuden matalimman osasävelen taajuuksia. Punaiset katkoviivat osoittavat koehenkilön puhuman vokaalin R1:n ja R2:n taajuuksia.



KUVIO 15. Vasemmanpuoleisessa kuvassa on esitetty koehenkilön 2 vokaalilla [ε:] laulamien näytteiden osasävelten suhteelliset voimakkuudet sävelkohtaisesti. Oikeanpuoleisessa kuvassa on esitetty kahden arvioijan arviot resonanssien taajuuksista perustaajuuden suhteen. Mustat katkoviivat kuvastavat kuuden matalimman osasävelen taajuutta. Punaiset katkoviivat osoittavat koehenkilön puhuman vokaalin R1:n ja R2:n taajuudet.



KUVIO 16. Vasemmanpuoleisessa kuvassa on esitetty koehenkilön 3 vokaalilla [ε:] laulamien näytteiden osasävelten suhteelliset voimakkuudet sävelkohtaisesti. Oikeanpuoleisessa kuvassa on esitetty kahden arvioijan arviot resonanssien taajuuksista perustaajuuden suhteen. Mustat katkoviivat kuvastavat kuuden matalimman osasävelen taajuutta. Punaiset katkoviivat osoittavat koehenkilön puhuman vokaalin R1:n ja R2:n taajuudet.



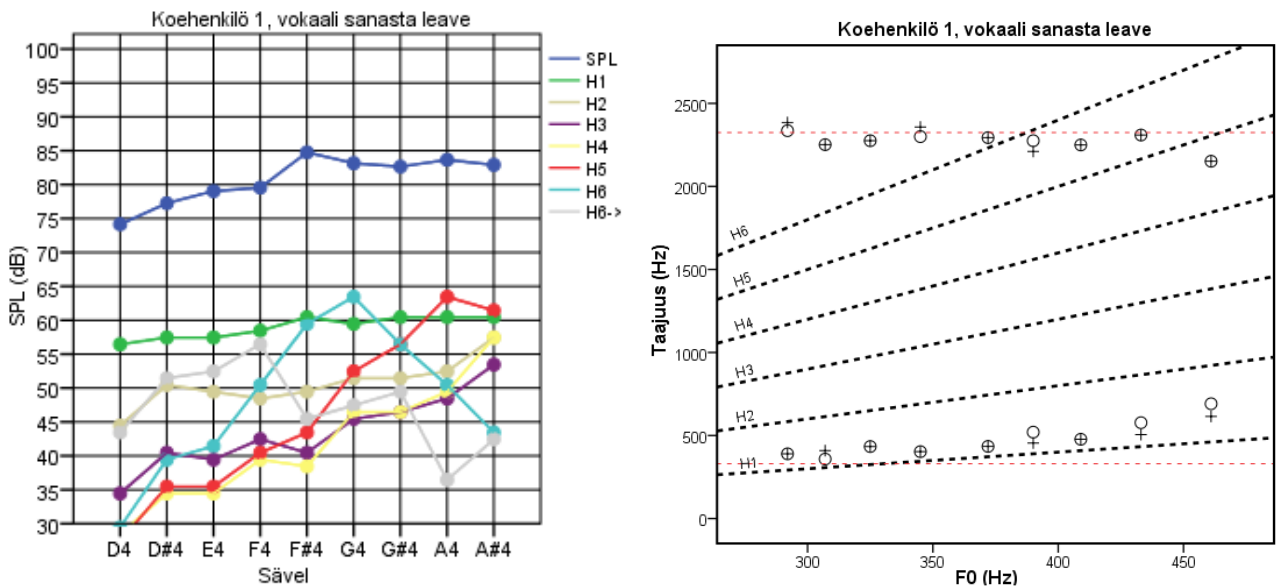
KUVIO 17. Vasemmanpuoleisessa kuvassa on esitetty koehenkilön 4 vokaalilla [ɛ:] laulamien näytteiden osasävelten suhteelliset voimakkuudet sävelkohtaisesti. Oikeanpuoleisessa kuvassa on esitetty kahden arvioijan arviot resonanssien taajuuksista perustaajuuden suhteen. Mustat katkoviivat kuvastavat kuuden matalimman osasävelen taajuutta. Punaiset katkoviivat osoittavat koehenkilön puhuman vokaalin R1:n ja R2:n taajuudet.

4.1.3 Vokaali [i:] sanasta leave

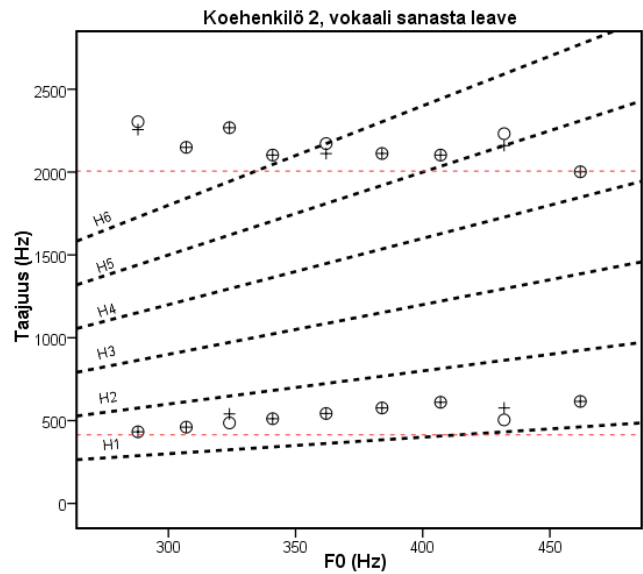
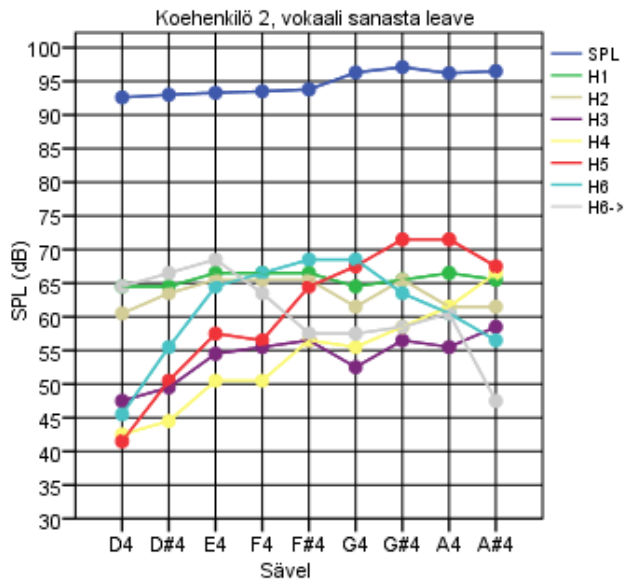
Kuvioista 18 - 21 on nähtävissä, että kaikilla koehenkilöillä [i:]-vokaalin äännössä R1 pysytteli ensimmäisen osasävelen yläpuolella ja kasvatti taajuuttaan sävelkorkeuden noustessa. R2:n taajuus ei muuttunut sävelkorkeuden noustessa kenelläkään koehenkilöllä siten, että muutoksen olisi voinut olettaa liittyvän merkittävästi myönteisemmän resonanssiasetuksen tavoitteluun. Toinen resonanssi vaikutti pääasiallisesti pysytelleeseen lähellä puheelle ominaista taajuutta. Poikkeuksena oli koehenkilö 2, jolla R2 virittyi H6:n tuntumaan sävelillä F4 ja F#4 ja H5:n tuntumaan sävelillä G#4 ja A4. Tällä virittämisellä saattoi olla jonkin asteista merkitystä koehenkilön äännössä. Ottaen kuitenkin huomioon tässä tutkimuksessa käytetyn resonanssitajuuksien arviointimenetelmän virhemarginaalin ei tämän virityksen merkityksestä voida tehdä kovin vahvoja johtopäätöksiä.

Tässä tutkimuksessa keskityttiin arvioimaan kahden matalimman resonanssin roolia äännössä. Tutkimuksen spektrien tarkempi tarkastelu vokaalilla [i:] antaa kuitenkin viitteitä siitä, että myös kolmannella resonanssilla R3 saattaisi olla merkitystä tehokkaimman resonanssitaktiikan saavuttamisessa [i:]ssä. Kuviossa 22 on näkyvissä koehenkilön 1 puhuman [i:]-vokaalin spektri ja kuviossa 23 hänen sävelellä G#4 laulamansa [i:]-vokaalin spektri. Puhutussa vokaalissa on erotettavissa kaksi erillistä toisiaan lähellä olevaa huippua, joista toinen on 2500 Hz:n alapuolella ja

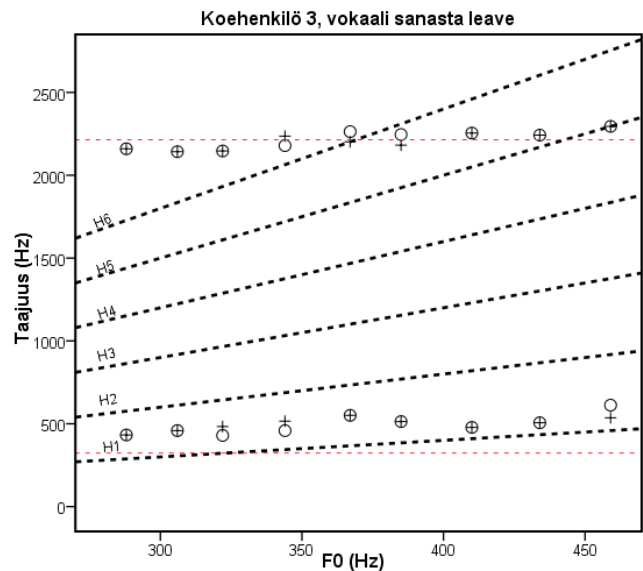
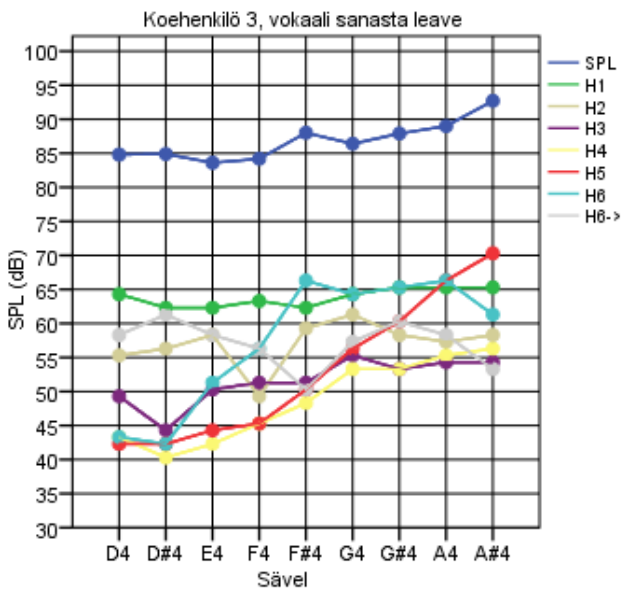
toinen 3000 Hz alapuolella. Laulettu vokaalin spektrin hälyssä sen sijaan näkyy yksi laajempi huippu taajuudella 2250 Hz. Myös koehenkilöllä 2 oli havaittavissa vastaavanlainen R2:n ja R3:n keskittymä kuin koehenkilöllä 1. Koehenkilöiden 3 ja 4 lauletuissa spektreissä näkyi kaksi tai kolme erillistä huippua noin 2000 Hz:n - 3000 Hz:n alueella (kuviot 24 - 25). Myös heidän tapauksissaan vaikuttaa siltä, että useamman resonanssin keskittymä vahvisti laajaa taajuusaluetta, johon kuului useita osasäveliä.



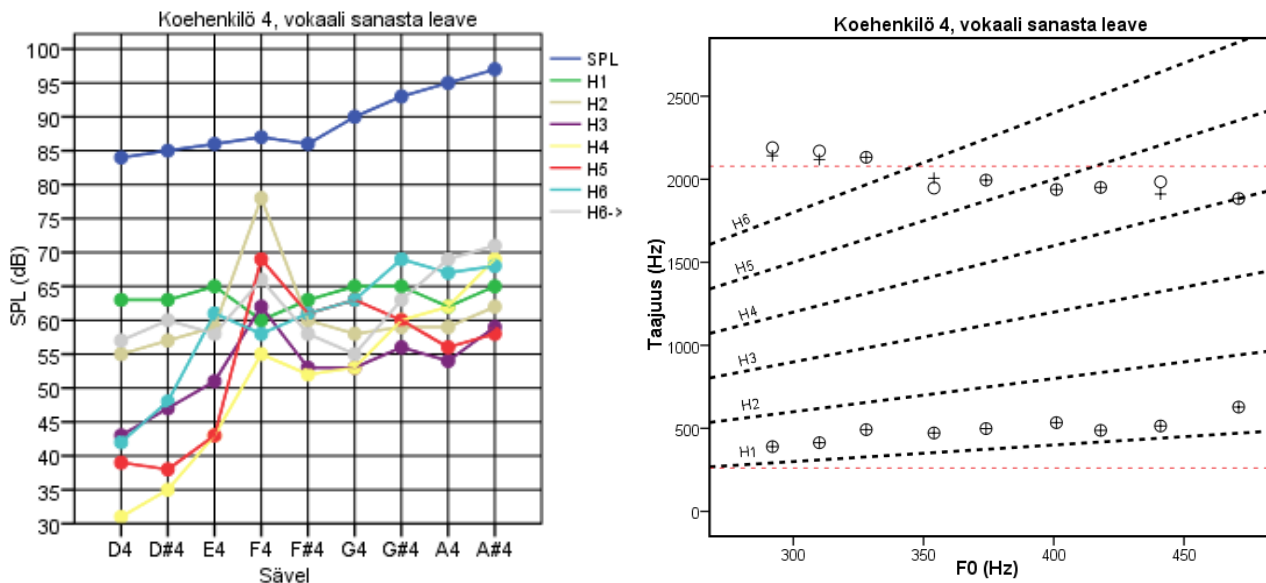
KUVIO 18. Vasemmanpuoleisessa kuvassa on esitetty koehenkilön 1 vokaalilla [i:] laulamien näytteiden osasävelten suhteelliset voimakkuudet sävelkohtaisesti. Oikeanpuoleisessa kuvassa on esitetty kahden arvioijan arviot resonanssien taajuuksista perustaajuuden suhteen. Mustat katkoviivat kuvastavat kuuden matalimman osasävelen taajuutta. Punaiset katkoviivat osoittavat koehenkilön puhuman vokaalin R1:n ja R2:n taajuudet.



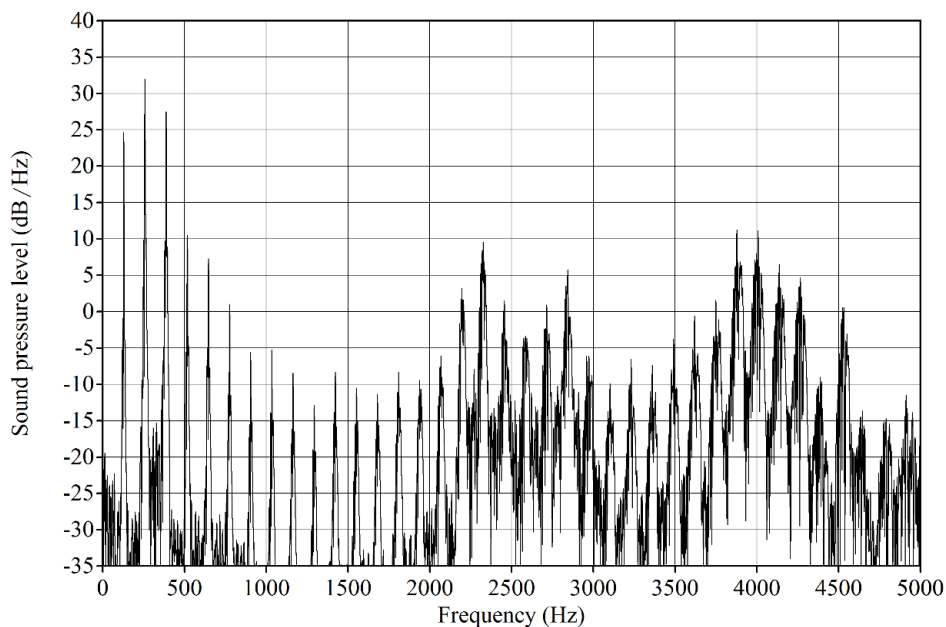
KUVIO 19. Vasemmanpuoleisessa kuvassa on esitetty koehenkilön 2 vokaalilla [i:] laulamien näytteiden osasävelten suhteelliset voimakkuudet sävelkohtaisesti. Oikeanpuoleisessa kuvassa on esitetty kahden arvioijan arviot resonanssien taajuuksista perustaajuuden suhteen. Mustat katkoviivat kuvastavat kuuden matalimman osasävelen taajuutta. Punaiset katkoviivat osoittavat koehenkilön puhuman vokaalin R1:n ja R2:n taajuudet.



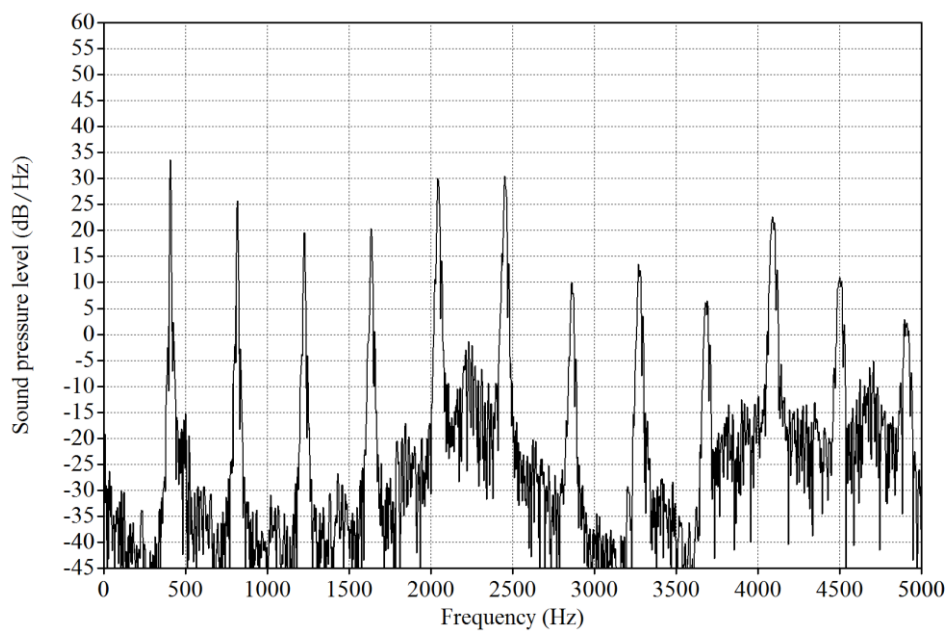
KUVIO 20. Vasemmanpuoleisessa kuvassa on esitetty koehenkilön 3 vokaalilla [i:] laulamien näytteiden osasävelten suhteelliset voimakkuudet sävelkohtaisesti. Oikeanpuoleisessa kuvassa on esitetty kahden arvioijan arviot resonanssien taajuuksista perustaajuuden suhteen. Mustat katkoviivat kuvastavat kuuden matalimman osasävelen taajuutta. Punaiset katkoviivat osoittavat koehenkilön puhuman vokaalin R1:n ja R2:n taajuudet.



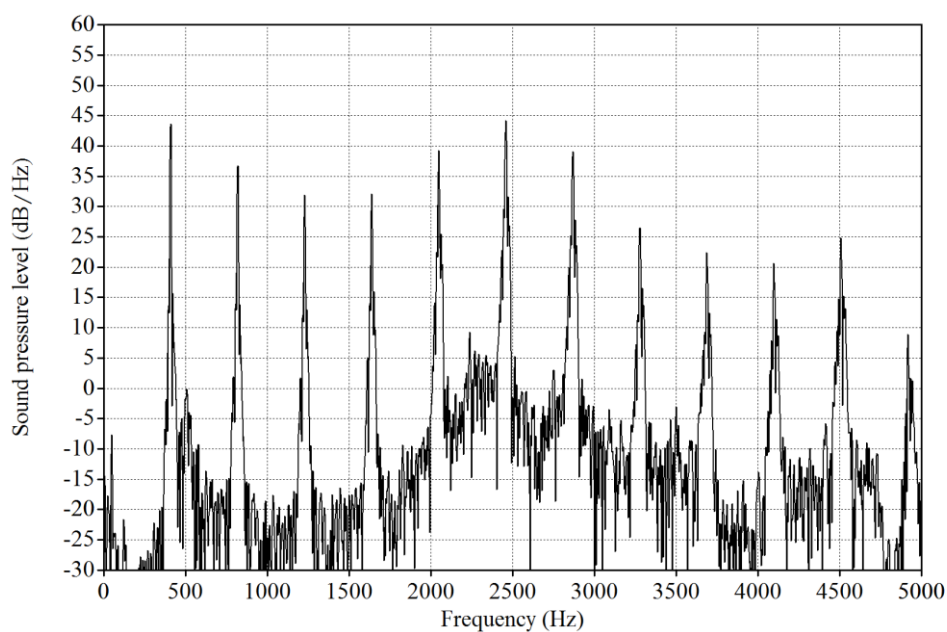
KUVIO 21. Vasemmanpuoleisessa kuvassa on esitetty koehenkilön 4 vokaalilla [i:] laulamien näytteiden osasävelten suhteelliset voimakkuudet sävelkohtaisesti. Oikeanpuoleisessa kuvassa on esitetty kahden arvioijan arviot resonanssien taajuuksista perustaajuuden suhteen. Mustat katkoviivat kuvastavat kuuden matalimman osasävelen taajuutta. Punaiset katkoviivat osoittavat koehenkilön puhuman vokaalin R1:n ja R2:n taajuudet.



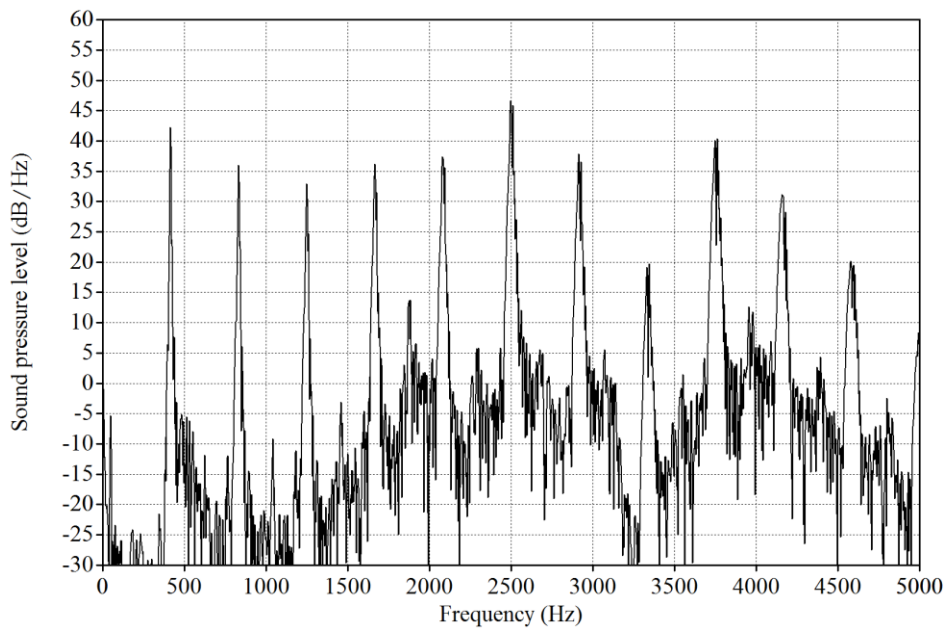
KUVIO 22. Koehenkilön 1 puhuman [i:]-vokaalin spektri. 2000 – 3000 Hz alueella on havaittavissa kaksi erillistä R2:n ja R3:n aikaan saamaa huippua.



KUVIO 23. Koehenkilön 1 sävelellä G#4 laulaman [i:] -vokaalin spektri. Hälyn muodossa on taajuudella 2250 Hz näkyvissä yksi laaja korostuma, joka on todennäköisesti R2:n ja R3:n yhteisvaikutuksen aikaan saama.



KUVIO 24. Koehenkilön 3 sävelellä G#4 laulaman [i:] -vokaalin spektri.



KUVIO 25. Koehenkilön 4 sävelellä G#4 laulaman [i:] -vokaalin spektri.

4.1.4 Ääntötehtävä 4

Ääntötehtävän 4 tarkoitus oli selvittää kuinka sattumanvaraisia resonanssien R1 ja R2 taajuudet olivat koehenkilöiden äännoissa. Taulukossa 4 on esitetty arvioidut resonanssitaajuudet ääntötehtävän 4 näytteille ja vastaavilla sävelillä ja vokaaleilla lauletuille ääntötehtävän 3 näytteille. Resonanssien taajuudet on laskettu molempien arvioijien arvioiden keskiarvoista. Taulukossa on merkitty keltaisella värillä ne resonanssien taajuudet, jotka poikkesivat tehtävissä 3 ja 4 vähintään 65 Hz:llä, joka on sävelellä G#4 (n. 415 Hz) noin 14 % kahden osasävelen välisestä kokonaisuudesta ($65 / 415 = 14,2 \%$). Oranssilla värillä on merkitty ne resonanssitaajuudet, jotka poikkesivat tehtävissä 3 ja 4 vähintään 100 Hz:llä, joka on sävelellä G#4 noin 25 % kahden osasävelen välisestä etäisyydestä.

Suurimmat erot resonanssitaajuuksissa oli koehenkilöllä 4. Vokaalilla [ʌ:] koehenkilöillä 1, 2 ja 3 ensimmäinen resonanssi sijoittui molemmissa ääntötehtävissä toisen osasävelen yläpuolelle. Koehenkilöllä 4 R1:n arvioitiin sijoittuvan suoraan toisen osasävelen kohdalle ääntötehtävän 4 näytteissä ja toisen osasävelen yläpuolelle tehtävän 3 näytteissä.

Ääntötehtävässä 3 oli rekisterirajan yläpuolella vokaalille [ɛ:] ominainen piirre ensimmäisen resonanssin sijoittuminen juuri toisen osasävelen yläpuolelle tai kohdalle. Ääntötehtävän 4 näytteissä oli havaittavissa sama piirre lukuun ottamatta koehenkilöä 4, jolla R1 sijoittui hieman toisen osasävelen alapuolelle tehtävän 4 molemmissa näytteissä.

Vokaalilla [i:] R1 pysytteli pääasiallisesti H1:n yläpuolella ääntötehtävissä 3, mikä oli havaittavissa myös tehtävän 4 näytteissä. Hertseissä mitattuna koehenkilöllä 4 oli suurimmat erot tehtävien välillä, mutta myös hänellä tehtävän 4 mittaukset olivat linjassa tehtävän 3 tuloksista havaitun trendin kanssa.

TAULUKKO 4. Erot R1:n ja R2:n taajuuksissa ääntötehtävien 3 ja 4 välillä.

Ääntötehtävä 4						Ääntötehtävä 3		
Koehenkilö	Äänne	Sävel	Taajuus (Hz)	R1	R2	Taajuus (Hz)	R1	R2
1	[ʌ:]	A4	440	953	1613	441	956	1580
1	[ʌ:]	G#4	414	932	1484	413	929	1549
1	[ɛ:]	G#4	415	899	1937	413	826	1859
1	[ɛ:]	A4	438	949	1898	437	947	1967
1	[i:]	G4	385	481	2406	390	488	2243
1	[i:]	A4	437	583	2331	433	541	2309
2	[ʌ:]	A4				439	1024	1573
2	[ʌ:]	G#4	413	929	1480	409	920	1466
2	[ɛ:]	G#4	417	973	1877	409	886	1772
2	[ɛ:]	A4	436	981	1853	443	960	1514
2	[i:]	G4	384	576	2112	384	576	2112
2	[i:]	A4	425	567	2125	432	540	2196
3	[ʌ:]	A4	429	930	1645	433	974	1624
3	[ʌ:]	G#4	404	1010	1616	409	920	1568
3	[ɛ:]	G#4	403	873	1948	406	812	2064
3	[ɛ:]	A4	430	896	1935	431	862	2011
3	[i:]	G4	381	476	2254	385	513	2214
3	[i:]	A4	431	503	2371	434	506	2242
4	[ʌ:]	A4	440	880	1393	442	995	1547
4	[ʌ:]	G#4	416	832	1456	417	869	1460
4	[ɛ:]	G#4	415	692	1764	417	834	1772
4	[ɛ:]	A4	443	849	1772	441	992	1691
4	[i:]	G4	389	454	2140	401	535	1938
4	[i:]	A4	443	628	1846	441	515	1948

= Ääntötehtävien välillä resonanssien taajuuksissa eroa yli 65 Hz

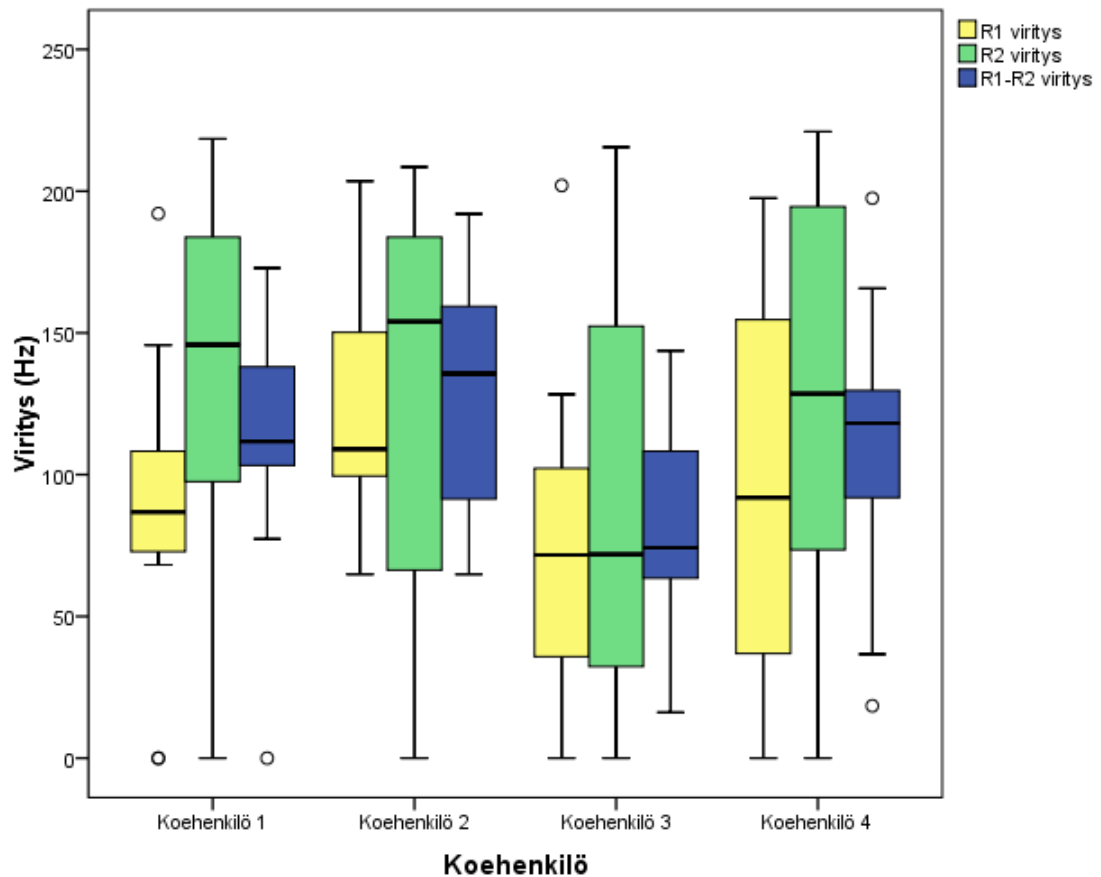
= Ääntötehtävien välillä resonanssien taajuuksissa eroa yli 100 Hz

4.2 Resonanssien viritys ja elektroglottografia

4.2.1 Resonanssien viritys

Resonanssien virityksen eli resonanssien ja osasävelten välisten etäisyyksien analysoinnissa on huomioitu sävelväli G4 – A#4. Sävelväli valittiin, koska virityksen merkityksen oletettiin olevan suurin juuri rekisterirajan yläpuolisilla korkeilla sävelillä, joilla osasävelten väliset etäisyydet ovat suurempia kuin matalammalla samoin kuin todennäköisyys sille, että resonanssien vaikutus ei osu minkään osasävelen kohdalle. Kuvion 15 laatikkojanakuvaajasta voidaan arvioida kuka koehenkilöistä viritti resonanssit lähimmäksi osasäveliä. Kuviossa laatikon sisällä oleva poikittainen viiva kuvastaa virityksen jakauman mediaania. Laatikoiden sisäpuolelle jää 50 % koehenkilön analysoiduista näytteistä. Muuttuja **R1 viritys** on ensimmäisen resonanssin etäisyys hertseinä sitä lähimmästä osasävelestä, **R2 viritys** toisen resonanssin etäisyys hertseinä sitä lähimmästä osasävelestä ja muuttuja **R1-R2 viritys** kahden edellisen keskiarvo.

Kuvion perusteella vaikuttaa siltä, että koehenkilöllä 3 oli pienimmät etäisyydet resonanssien ja osasävelten välillä. Hänellä **R1-R2 virityksen** mediaani sijaitsi 74 Hz:n kohdalla ja viidessäkymmenessä prosentissa näytteistä **R1-R2 viritys** oli välillä 62 Hz – 109 Hz. Resonanssien viritykseen nojasi laulussaan vähiten koehenkilö 2. Hänellä **R1-R2 virityksen** mediaani sijaitsi 136 Hz:n kohdalla. Huomioimisen arvoista on myös se, että kaikilla koehenkilöillä paitsi koehenkilöllä 3 **R1-virityksen** mediaani oli pienempi kuin **R2-virityksen** mediaani. Myös **R1-virityksen** hajonta oli huomattavasti pienempi kuin **R2-virityksen** hajonta kaikilla koehenkilöillä paitsi koehenkilöllä 4. Tämä antaa viitteitä siitä, että koehenkilöillä R1:n viritys olisi pääasiallisesti merkityksellisempi kuin R2:n viritys ainakin kun tarkastellaan kaikkia tutkittuja vokaaleja yhdessä. Koehenkilöiden välillä resonanssien virittämisessä havaittujen erojen tilastollista merkitsevyyttä testattiin vielä yksisuuntaisella varianssianalyysillä, jonka tulokset ovat nähtävissä taulukossa 4. Kaikki muuttujat toteuttivat Levenen testin perusteella olettamuksen varianssien yhtäsuuruudesta. Ensimmäisen resonanssin ja molempien resonanssien yhteisviritys poikkesivat koehenkilöiden välillä tilastollisesti melkein merkitsevästi (ks. taulukko 5).



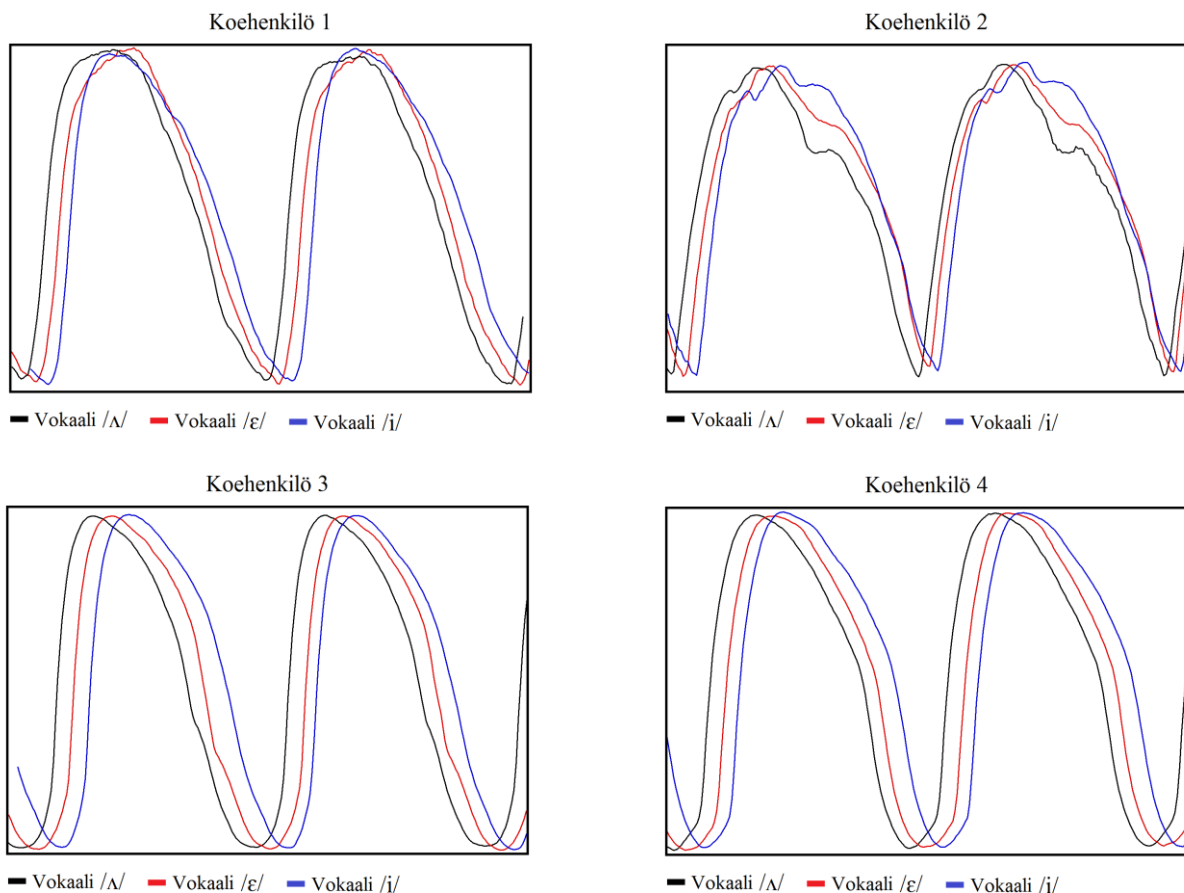
KUVIO 26. Resonanssien viritys osasäveliin koehenkilöittäin esitettynä.

TAULUKKO 5. koehenkilöiden välillä resonanssien virityksessä havaittujen erojen tilastollinen merkitsevyys varianssi-analyysillä testattuna.

		ANOVA				
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
R1 viritys	Between Groups	25888,586	3	8629,529	3,072	,034*
	Within Groups	182609,377	65	2809,375		
	Total	208497,963	68			
R2 viritys	Between Groups	22766,623	3	7588,874	1,715	,173
	Within Groups	287636,422	65	4425,176		
	Total	310403,045	68			
R1-R2 viritys	Between Groups	19172,213	3	6390,738	3,935	,012*
	Within Groups	105563,490	65	1624,054		
	Total	124735,703	68			

4.2.2 Elektroglottografian tulokset

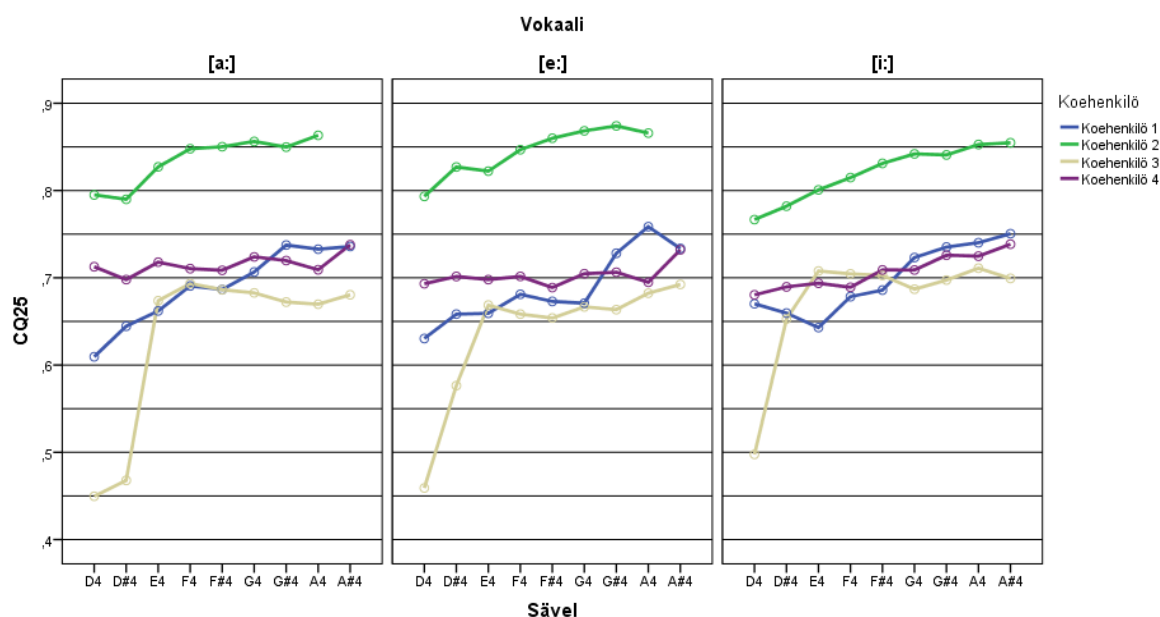
Kuviossa 27 on kaikilta neljältä koehenkilöltä esimerkit vokaaleilla [ʌ:], [ɛ:] ja [i:] laulettujen näytteiden EGG-signaaleista. Sävelkorkeus on kaikissa näytteissä G#4 (n. 415 Hz). Koehenkilöllä 2 signaalin muoto oli huomattavasti erilaisempi kuin muilla koehenkilöillä. Siinä oli havaittavissa hälyä, joka ilmenee signaalin huippujen aaltoiluna. Rothenbergin (1992) mukaan tällaista hälyä voi syntyä muun muassa äänihuulivärähtelyn aiheuttaman muun kudoksen kuten taskuhuulten, kielen tai elektrodien kohdalla olevan ihon värähtelyn myötä. Se näkyy yleensä signaalissa voimakkaimmin silloin kun kaulalla olevat elektrodit eivät ole optimaalisella korkeudella äänihuuliin nähden (Rothenberg, 1992). Myös koehenkilöllä 1 oli havaittavissa vastaavanlaista, mutta huomattavasti heikompaa hälyä. Koehenkilöiden 3 ja 4 EGG-signaalit näyttäsivät olleen laadultaan parhaimmat.



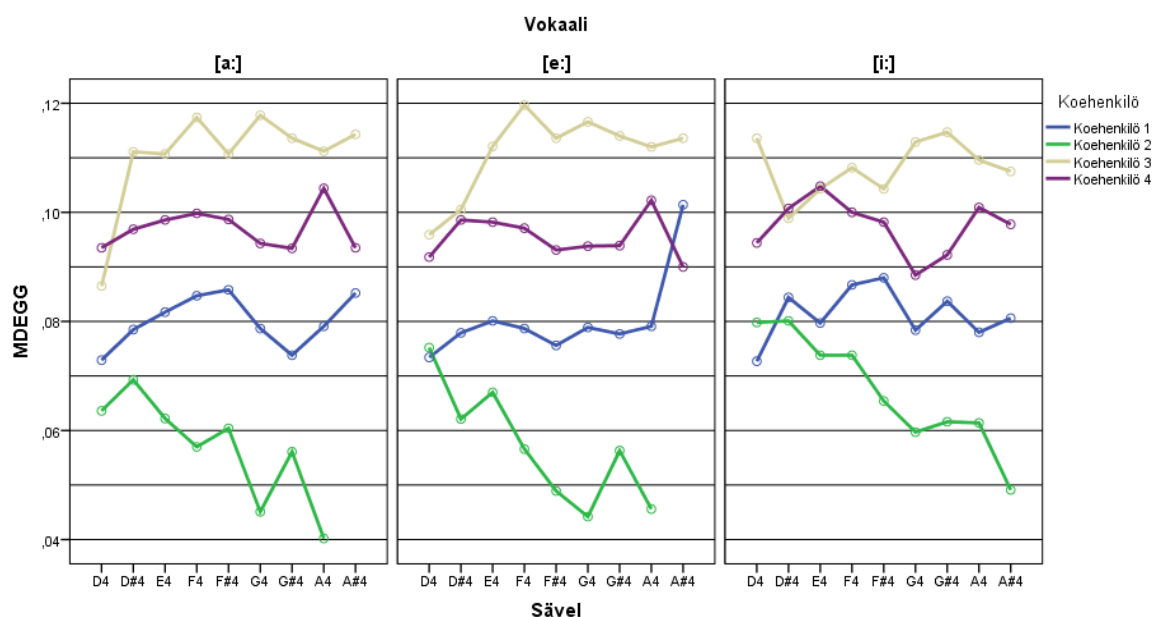
KUVIO 27. Esimerkit koehenkilöiden EGG-signaaleista sävelkorkeudella G#4 (n. 415 Hz).

Kuviossa kontaktin määrä lisääntyy signaalin kasvaessa. Eri vokaalien amplitudit on muunnettu samansuuruisiksi vertailun helpottamiseksi. Kuvissa on esitetty noin 2,5 millisekunnin otos signaalista (hieman yli kaksi värähtelyn periodia).

Näytteistä mitattujen EGG-parametrien tulokset on esitetty kuvioissa 28 – 31 sävel- ja vokaalikohtaisesti jokaiselle koehenkilölle. Kuviosta 28 on nähtävissä, että CQ ei muuttunut suhteessa sävelkorkeuteen minkään kaikille koehenkilöille yhteisen tavan mukaan. CQ näyttää kasvaneen jonkin verran sävelkorkeuden noustessa kaikilla vokaaleilla koehenkilöillä 1 ja 2. Koehenkilön 4 /i/-vokaalissa oli havaittavissa CQ:n kasvua sävelkorkeuden noustessa toisin kuin kahdella muulla vokaalilla. Koehenkilöllä 3 CQ kasvoi kaikilla vokaaleilla kolmen matalimman säveln aikana. Korkeammilla sävelillä se ei kuitenkaan osoittanut suoraviivaista kasvua tai laskua. Koehenkilöltä 2 mitattiin suurimmat CQ-arvot. Hänen EGG-signaalissaan ilmeni runsaasti hälyä, minkä takia hänen tuloksiinsa on syytä suhtautua varauksella. Muiden koehenkilöiden CQ-arvot vaihtelivat suurin piirtein välillä 0,63 – 0,76.



KUVIO 28. Kontaktiosamäärä (CQ) esitetty sävelkorkeuden suhteen. Eriväriset käyrät kuvastavat eri koehenkilöitä. Tulokset on esitetty jokaiselle kolmelle tutkitulle vokaalille erikseen omassa kuvaajassaan.



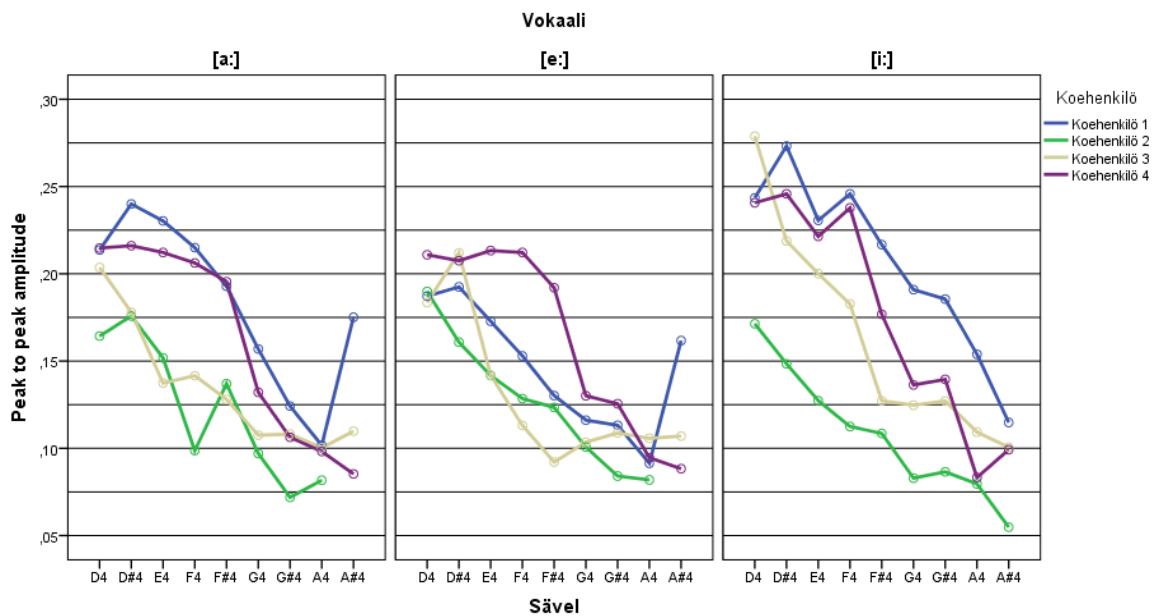
KUVIO 29. Normalisoidun EGG-signaalin ensimmäinen derivaatan maksimi (MDEGG) esitetty sävelkorkeuden suhteen. Eriväriset käyrät kuvastavat eri koehenkilöitä. Tulokset on esitetty jokaiselle kolmelle tutkitulle vokaalille erikseen omassa kuvaajassaan.

Kuviossa 29 on esitetty mittaustulokset normalisoidun EGG-signaalin ensimmäiselle derivaatalle (MDEGG). Myös tämän parametrin tulokset vaihtelivat koehenkilöittäin. Yhtäläisyyksiä ei ollut havaittavissa niinkään koehenkilöiden välillä, mutta jossain määrin saman koehenkilön tuottamien eri vokaalien välillä. Myös MDEGG:ssä samoin kuin CQ:ssa oli havaittavissa koehenkilöllä 3 selvä kasvu kolmen matalimman sävelen kohdalla sävelkorkeuden noustessa. Koehenkilön 2 käyrät näyttivät keskimäärin laskevan sävelkorkeuden noustessa. Suurimmat MDEGG-arvot tuotti koehenkilö 3.

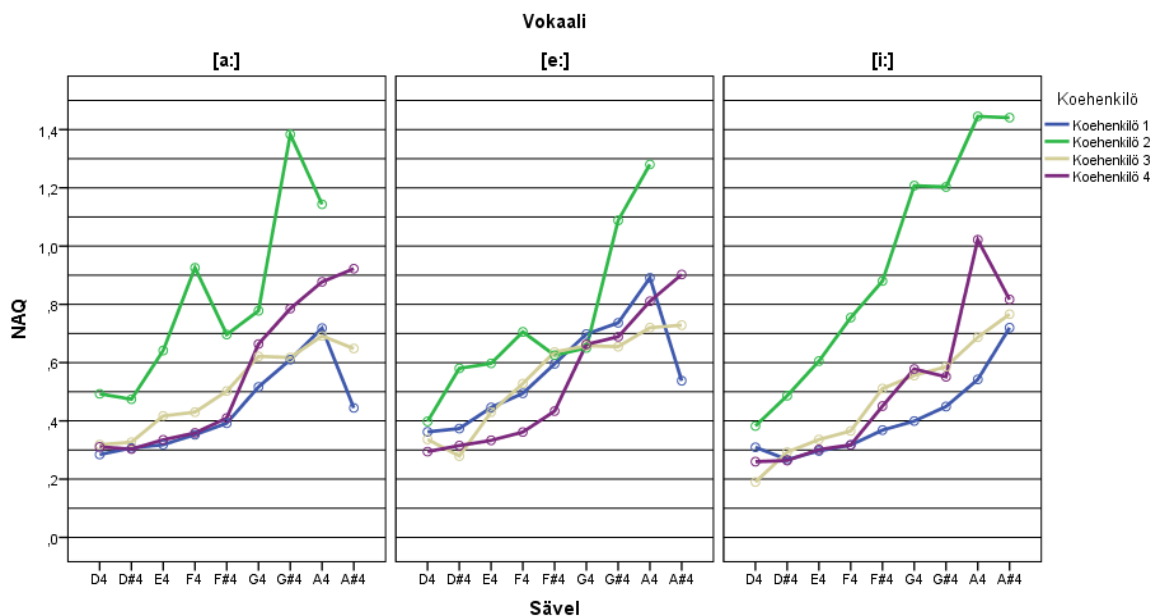
Huipusta laaksoon amplitudi vaikutti olevan vahvasti kytköksissä sävelkorkeuteen. Jokaisen koehenkilön ja vokaalin kohdalla tämä on nähtävissä kuviossa 30. Koehenkilöllä 1 amplitudi kasvoi huomattavasti viimeiselle sävelelle siirryttäessä vokaaleilla [ʌ:] ja [ɛ:]. Tämä johtui todennäköisesti ainakin osaksi äänenpainetason noususta, joka on nähtävissä aiemmista kuvioista 8 ja 14.

NAQ kuten kuvio 31 osoittaa kasvoi pääasiallisesti sävelkorkeuden noustessa. Koehenkilöllä 2 nähtäviä runsaita kahden vierekkäisen sävelen välisiä eroja on vaikea selittää. Hänen EGG-signaalin, niin kuin aiemmin mainittua, oli huonolaatuisempaa kuin muilla koehenkilöillä, mikä saattaa vaikuttaa jossain määrin tuloksiin. Myös kurkunpään vertikaalisen sijainnin muutos saattaa vaikuttaa EGG-signaalista laskettuihin laaksosta huippuun amplitudin ja NAQ:n arvoihin. Tämä johtuu siitä, että signaalin voimakkuus, joka vaikuttaa näihin parametreihin, saattaa muuttua runsaasti kun kurkunpää siirtyy etäämmälle elektrodeista. Kurkunpään sijainnin muutos saattaa

myös osaltaan selittää koehenkilöllä 1 havaittavia suuria muutoksia kahden korkeimman sävelen välillä sekä amplitudissa että NAQ:ssa vokaaleilla [ʌ:] ja [ɛ:].



KUVIO 30. EGG-signaalin huipusta laaksoon amplitudi esitetty sävelkorkeuden suhteen. Eriväriset käyrät kuvastavat eri koehenkilöitä. Tulokset on esitetty jokaiselle kolmelle tutkitulle vokaalille erikseen omassa kuvaajassaan.

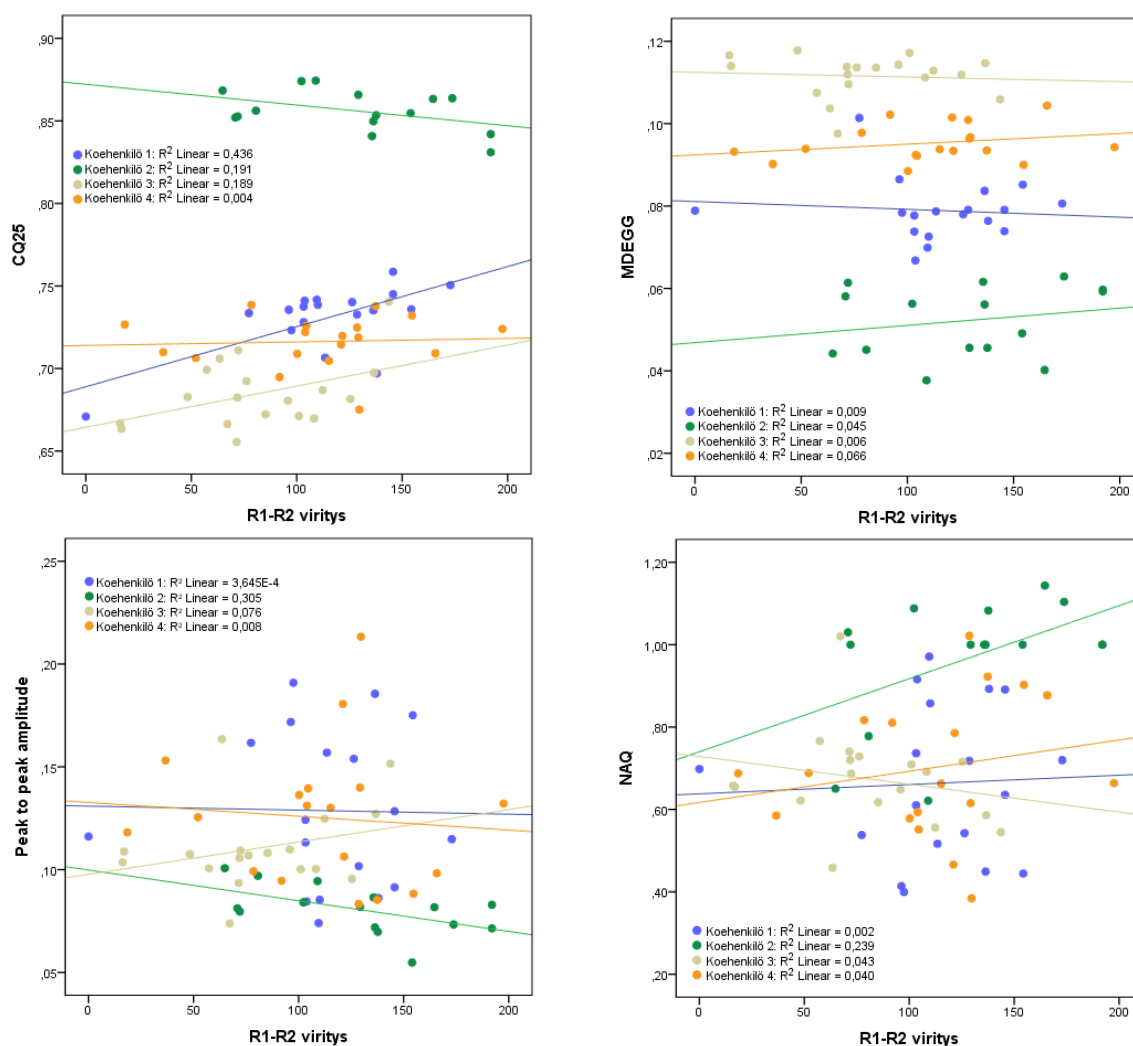


KUVIO 31. Normalisoitu amplitudiosamäärä (NAQ) esitetty sävelkorkeuden suhteen. Eriväriset käyrät kuvastavat eri koehenkilöitä. Tulokset on esitetty jokaiselle kolmelle tutkitulle vokaalille erikseen omassa kuvaajassaan.

4.2.3 EGG-parametrien ja resonanssien virityksen yhteydet

Resonanssien virityksen ja EGG-parametrien yhteyksien tarkastelemiseksi muodostettiin kaikille EGG-parametrille ja molempien resonanssien yhteisviritykselle (**R1-R2 viritys**) pisteparvikuvaajat (ks. kuvio 32). CQ:lle ja MDEGG:lle kuvaajiin muodostui jokaiselle koehenkilölle selkeä oma pisteparvi. Amplitudin (huipusta laaksoon amplitudi) ja NAQ:n kohdalla koehenkilöiden keskiarvot ja hajonnat näyttäisivät olleen hieman lähempänä toisiaan, vaikka eroa on näidenkin kohdalla havaittavissa. Taulukossa 6 on näkyvissä EGG-parametrien ja resonanssien virityksen väliset korrelaatiot. Kaikki muuttujat eivät olleet kaikilla koehenkilöillä Shapiro-Wilk – testin perusteella normaalijakautuneita. Normaali-jakautumattomat muuttujat on merkitty taulukkoon harmaalla fontilla ja niiden kohdalla käytettiin Pearsonin korrelaatiokerrointa sijaan Spearmanin järjestyskorrelaatiokerrointa. Analyysiin otettiin mukaan ainoastaan neljä korkeinta laulettua säveltä (G4, G#4, A4 ja A#4), jotta sävelkorkeuden muutoksen vaikutusta saataisiin rajoitettua ja koska rekisterirajan yläpuolella virityksen merkitys on todennäköisesti suurempi kuin matalammilla sävelillä. Korrelaatiot laskettiin jokaiselle koehenkilölle yhdessä ja erikseen. Koska koehenkilön 2 tulokset poikkesivat huomattavasti muiden koehenkilöiden tuloksista, kuten kuviosta 32 näkyy, laskettiin yhteiskorrelaatio vielä koehenkilöille 1, 3 ja 4.

Koehenkilökohtaisesti tarkasteltuna taulukosta 6 on nähtävissä, että ainoastaan kahdella koehenkilöllä jokin EGG-parametri korreloi resonanssien virityksen kanssa. Koehenkilöllä 1 CQ korreloi merkitsevästi molempien resonanssien yhteisvirityksen (**R1-R2 viritys**) kanssa. Koehenkilöllä 2 CQ korreloi merkitsevästi ja negatiivisesti molempien resonanssien yhteisvirityksen kanssa ja lisäksi melkein merkitsevästi ja negatiivisesti amplitudin kanssa. Tärkein taulukossa 6 esitetty tulos on resonanssien yhteisvirityksen ja CQ:n välinen erittäin merkitsevä korrelaatio sekä MDEGG:n ja resonanssien yhteisvirityksen negatiivinen merkitsevä korrelaatio kaikkien koehenkilöiden ollessa mukana analyysissä. Näiden korrelaatioiden merkitystä arvioidaan tarkemmin tutkimuksen pohdintaosiossa.



KUVIO 32. Molempien resonanssien yhteisviritystä kuvastavan muuttujan (**R1-R2 viritys**) suhde EGG-parametreihin. Kuvioissa mukana kaikki 3 tutkittua vokaalia ([Λ :], [i :] ja [ϵ :]).

TAULUKKO 6. Korrelaatiot resonanssien viritystä kuvastavien muuttujien ja EGG-parametrien välillä.

KOEHENKILÖ 1

	N=18	CQ 25	MDEGG	P-t-P ampl.	NAQ	F0
R1 viritys	Korrelaatio	0,185	0,110	0,202	-0,226	0,228
	sig.	ns	ns	ns	ns	ns
R2 viritys	Korrelaatio	0,298	-0,007	-0,193	0,249	0,362
	sig.	ns	ns	ns	ns	ns
R1-R2 viritys	Korrelaatio	,472 [*]	0,074	-0,116	0,184	0,461
	sig.	0,048	ns	ns	ns	(0,054)
F0	Korrelaatio	0,493 [*]	0,085	-0,281	0,307	
	sig.	0,038	ns	ns	ns	

KOEHENKILÖ 2

	N=15	CQ 25	MDEGG	P-t-P ampl.	NAQ	F0
R1 viritys	Korrelaatio	-0,760 [*]	0,467	-0,341	0,316	-0,057
	sig.	0,001	ns	ns	ns	ns
R2 viritys	Korrelaatio	-0,052	-0,043	-0,485	0,300	-0,056
	sig.	ns	ns	ns	ns	ns
R1-R2 viritys	Korrelaatio	-0,437	0,211	-0,552 [*]	0,396	-0,102
	sig.	ns	ns	0,033	ns	ns
F0	Korrelaatio	0,433	-0,283	-0,297	0,224	
	sig.	ns	ns	ns	ns	

KAIKKI KOEHENKILÖT

	N=69	CQ 25	MDEGG	P-t-P ampl.	NAQ	F0
R1 viritys	Korrelaatio	0,364 ^{**}	-,256 [*]	-0,213	0,220	0,113
	sig.	0,002	0,033	ns	ns	ns
R2 viritys	Korrelaatio	0,244 [*]	-0,178	-0,071	0,129	0,165
	sig.	0,043	ns	ns	ns	ns
R1-R2 viritys	Korrelaatio	0,434 ^{**}	-0,341 ^{**}	-0,176	0,229	0,154
	sig.	0,000	0,004	ns	ns	ns
F0	Korrelaatio	0,173	0,041	-0,158	0,217	
	sig.	ns	ns	ns	ns	

KOEHENKILÖ 3

	N=18	CQ 25	MDEGG	P-t-P ampl.	NAQ	F0
R1 viritys	Korrelaatio	0,067	-0,101	0,059	-0,221	-0,184
	sig.	ns	ns	ns	ns	ns
R2 viritys	Korrelaatio	0,377	-0,179	0,239	-0,133	0,486 [*]
	sig.	ns	ns	ns	ns	0,041
R1-R2 viritys	Korrelaatio	0,434	-0,112	0,214	-0,269	0,274
	sig.	(0,072)	ns	ns	ns	ns
F0	Korrelaatio	0,192	-0,256	-0,211	0,514 [*]	
	sig.	ns	ns	ns	0,029	

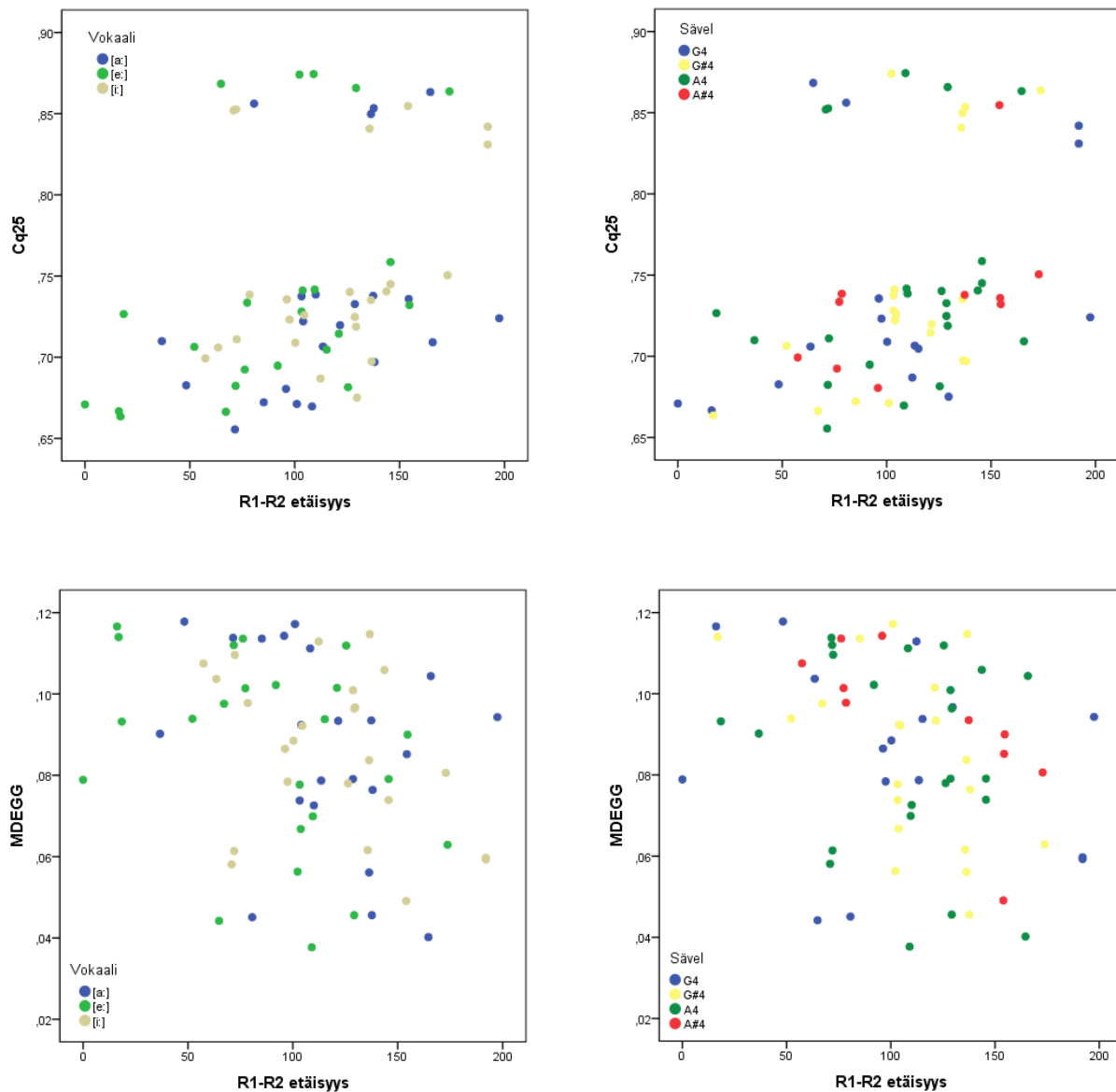
KOEHENKILÖ 4

	N=18	CQ 25	MDEGG	P-t-P ampl.	NAQ	F0
R1 viritys	Korrelaatio	0,306	0,216	-0,168	0,198	0,317
	sig.	ns	ns	ns	ns	ns
R2 viritys	Korrelaatio	-0,206	0,126	0,044	0,071	-0,358
	sig.	ns	ns	ns	ns	ns
R1-R2 viritys	Korrelaatio	0,060	0,256	-0,088	0,200	-0,046
	sig.	ns	ns	ns	ns	ns
F0	Korrelaatio	0,637 ^{**}	0,054	-0,618 ^{**}	0,677 ^{**}	
	sig.	0,004	ns	0,006	0,002	

KOEHENKILÖT 1, 2 ja 3

	N=54	CQ 25	MDEGG	P-t-P ampl.	NAQ	F0
R1 viritys	Korrelaatio	0,297 [*]	-0,106	0,015	-0,023	0,185
	sig.	0,029	ns	ns	ns	ns
R2 viritys	Korrelaatio	0,370 ^{**}	-0,265	0,003	0,094	0,188
	sig.	0,006	0,052	ns	ns	ns
R1-R2 viritys	Korrelaatio	0,501 ^{**}	-0,336 [*]	0,039	0,037	0,226
	sig.	0,000	0,013	ns	ns	ns
F0	Korrelaatio	0,413 ^{**}	-0,068	-0,325 [*]	0,420 ^{**}	
	sig.	0,002	ns	0,017	0,002	

Kuviossa 33 on vielä esitetty voimakkaimmin resonanssien virituksen kanssa korreloineille EGG-parametreille pisteparvikuviot siten, että myös vokaalin ja sävelkorkeuden vaikutus nähtävissä. Vokaalin ja sävelkorkeuden vaikutusta CQ:n ja MDEGG:iin testattiin myös yksisuuntaisella varianssianalyysillä. Analyysissä selitettävänä muuttujina olivat CQ ja MDEGG. Molempien selittävien muuttujien (sävelkorkeus ja vokaali) vaikutusta selitettäviin muuttujiin testattiin erikseen. Testin perusteella CQ:n eikä MDEGG:n keskiarvot poikenneet tilastollisesti merkittävästi eri vokaalien tai sävelkorkeuksien välillä (ks. taulukko 6). CQ:n testauksessa jätettiin testistä pois koehenkilön 2 arvot, koska ne aiheuttivat otoksen poikkeamisen normaalijakaumasta. Testillä saadut P-arvot näkyvät taulukossa 6.



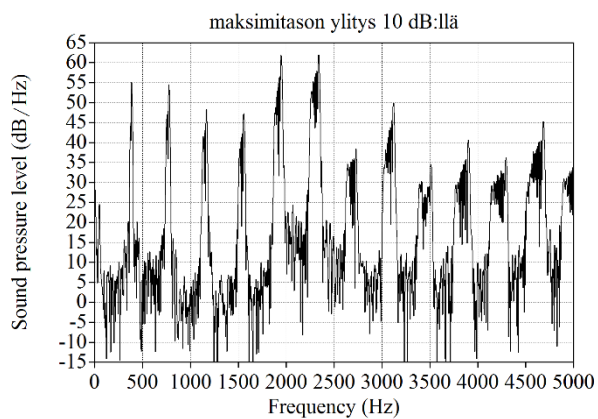
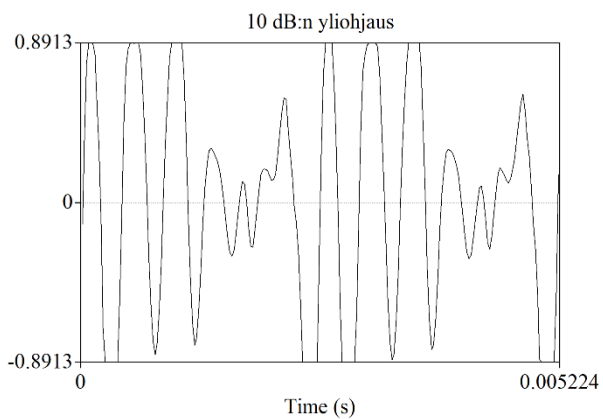
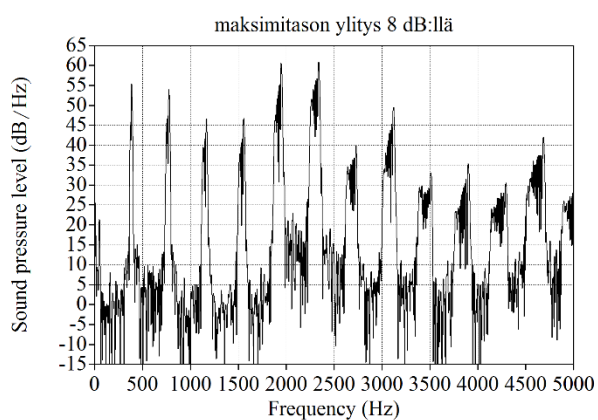
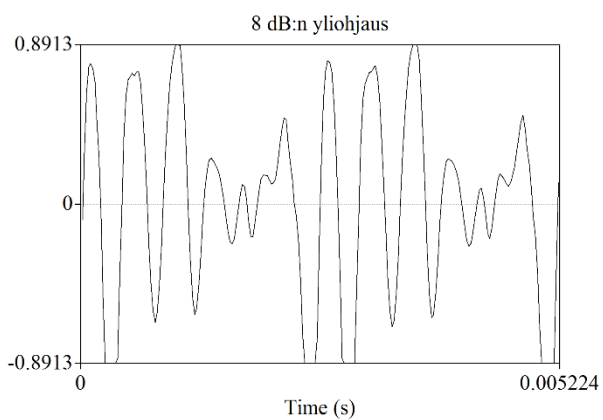
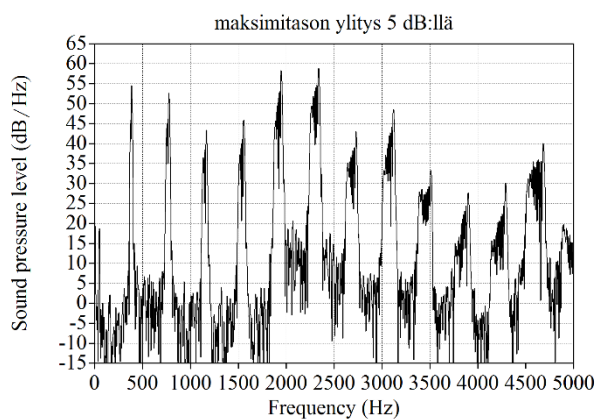
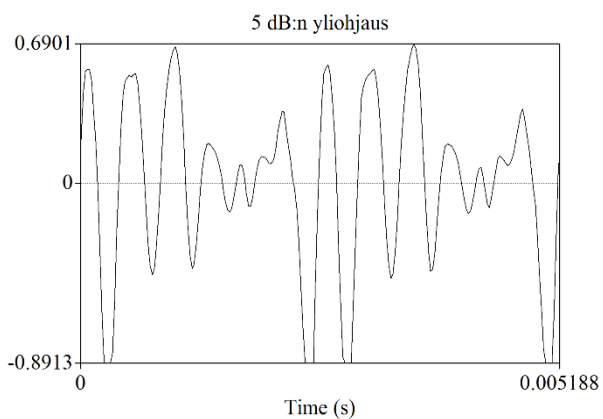
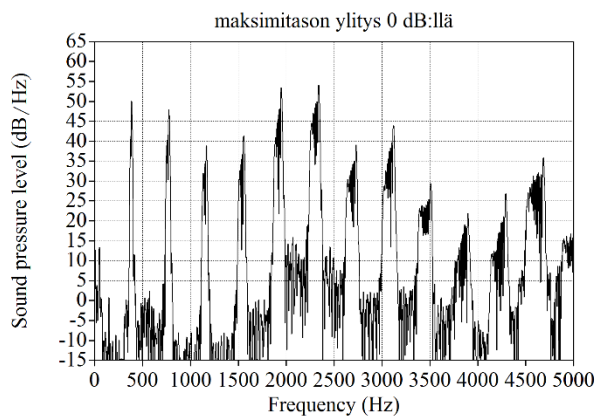
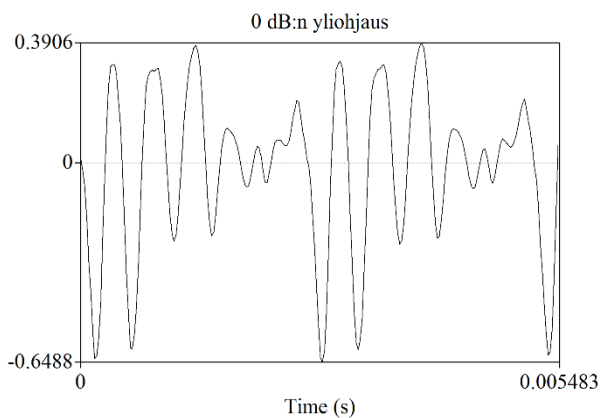
KUVIO 33. Resonanssien viritys ja EGG-parametrit vokaaleittain ja sävelittäin.

TAULUKKO 7. CQ:n ja MDEGG:n riippuvuus sävelestä ja vokaalista.

CQ	ANOVA			
	MDEGG			
	F	Sig.	F	Sig.
Sävel	1,653	0,189	Sävel	0,415
Vokaali	1,752	0,184	Vokaali	0,026

4.3 Signaalin yliohjautumisen vaikutus spektriin

Kuviossa 7 on esitetty signaalin yliohjautumisen asteittaiset vaikutukset spektriin. Vasemmalla puolella on otos signaalin aaltomuodosta ja oikealla puolella noin 0,45 sekunnin ajanjaksosta tuotettu spektrikuvaaja. Aaltomuodon ja spektrin kohdalle merkitty maksimitason ylittyminen desibeleinä ei pidä välttämättä täysin paikkaansa, koska analysoitu ajanjakso ei ollut peräisin alkuperäisen näytteen voimakkaimmasta kohdasta. Kuvioista on nähtävissä, että yliohjautuminen vaikutti spektriin voimakkaimmin korkeimmilla osasävelillä osasävelestä H8 ylöspäin. Kuuden matalimman osasävelen suhteelliset voimakkuudet pysyivät suurin piirtein samana. Viimeisessä spektrikuvaajassa, joka on muodostettu 10 dB:llä maksimisignaalityson ylittäneestä näytteestä, H7 on noin 23 dB matalampi kuin H6. Ensimmäisessä spektrikuvassa, jossa yliohjautumista ei tapahtunut, näiden osasävelten välinen ero on noin 16 dB.



KUVIO 34. Yliohjautumisen vaikutus spektriin esitetty asteittain. Ääninäyteet ylittävät äänikortin maksimisignaaltason 5, 8 ja 10 dB:llä.

5 POHDINTA

Pohdinta aloitetaan vastaamalla tulosten pohjalta luvussa kaksi esitettyihin tutkimuskysymyksiin. Tuloksia pohditaan suhteessa kirjallisuuteen ja esitettyihin hypoteeseihin. Ensiksi käsitellään vokaalikohtaisesti tutkimuskysymykset yksi ja kaksi, jotka liittyivät kahden matalimman resonanssin ja osasävelten välisiin suhteisiin sekä koehenkilöillä havaittuihin mahdollisiin resonanssitaktiikoihin. Sen jälkeen pohditaan resonanssin ja äänilähteen yhteyttä tutkimuskysymyksen kolme tiimoilta. Pohdinnan lopussa arvioidaan tutkimukseen vaikuttaneita virhelähteitä ja yleisesti tutkimuksen onnistumista sekä tulosten merkitsevyyttä.

5.1 *Resonanssitaktiikat*

Tulosten pohjalta ehdotetut resonanssitaktiikat mukailivat suurelta osin aiemmissa tutkimuksissa ehdotettuja ei-klassisten laulajien resonanssitaktiikoita. Niin kuin saattoi olettaa, eroja havaittiin raportoituuihin klassisten laulajien resonanssitaktiikoihin. Selkein resonanssiin liittyvä ero klassisen ja ei-klassisen laulutavan välillä on todennäköisesti se, että ei-klassisilla laulajilla kaksi matalinta resonanssia ovat yleensä suuremmilla taajuuksilla kuin klassisilla laulajilla kuten mm. Sundberg ym. (2011) ovat osoittaneet. Avoimille vokaaleille on näiden kahden tyylin välille ehdotettu vielä yksityiskohtaisempaa eroa. On arvioitu, että rekisterirajan yläpuolella klassisilla miesäänillä H3 on usein hallitseva osasävel spektrissä kun taas ei-klassisilla laulajilla H2. Toinen osasävel hallitsi spektriä myös tämän tutkimuksen koehenkilöillä vokaaleilla [ʌ] ja [ɛ]. Syitä klassisen ja ei-klassisen laulutavan resonanssiin liittyviin eroihin käsitellään tarkemmin pohdintaluvun loppupuolella.

5.1.1 Vokaali [ʌ:]

Vokaalille [ʌ:] on esitetty aiemmissa tutkimuksissa erilaisia resonanssitaktiikoita. Yksi yleinen johtopäätös on ollut, että klassisilla mieslaulajilla rekisterirajan yläpuolella kolmas osasävel olisi spektrin hallitsevin komponentti, kun taas ei-klassisilla laulajilla toinen osasävel. Tähän viittaavia tuloksia ovat saaneet muun muassa Neumann ym. (2005), Titze ja Worley (2009) sekä klassisilla laulajilla Schutte ym. (2005). Naislaulajien ei-klassiselle belttaus-laululle on ehdotettu

resonanssitaktiikkaa, jossa toinen osasävel voimistuu pääasiallisesti ensimmäisen resonanssin tuntumassa (Bourne ja Garnier 2010) sekä resonanssitaktiikkaa, jossa toinen, kolmas ja neljäs osasävel voimistuvat yhdessä kahden matalimman resonanssin vaikutuksen alaisina (Bestebreurtje & Schutte 2000). Vaikka voimakas toinen osasävel on yleensä nähty ei-klassisen laulun tunnusmerkkinä, kävi Henrichin ym. (2011) tuloksista ilmi, että myös klassisessa mieslaulussa esiintyy viritystä, jossa ensimmäinen resonanssi osuu lähelle toisen osasävelen taajuutta rekisterirajan tuntumassa ja yläpuolella.

Tässä tutkimuksessa koehenkilöiden välillä oli havaittavissa yhteneviä piirteitä, jotka olivat myös linjassa aiempien tutkimusten kanssa. Selkein tällainen oli toisen osasävelen hallitsevuus rekisterirajan yläpuolella sävelvälillä G4 – A#4. Resonanssiarvioiden perusteella ensimmäinen resonanssi ei kuitenkaan yleensä osunut samalle taajuudelle kyseisen osasävelen kanssa, vaan yleisemmin pysytteli sen yläpuolella. Tämä havainto on osaltaan mielenkiintoinen, koska se on linjassa epälineaarisen lähde-suodin teorian kanssa. Aiemmissä tutkimuksissa, joissa on mitattu resonanssien taajuuksia, ei ole havaittu, että resonanssit virittyisivät pääsääntöisesti osasävelten yläpuolelle, vaan yhtä todennäköisesti niiden kohdalle tai alapuolelle (esim. Henrich ym. 2011). Ainoa tätä teoriaa myötäillyt tutkimus on ollut Titzen ja Worleyn (2009) tutkimus, jossa laskennallisen mallin pohjalta oletettiin olevan näin. Tämän kertaisen tutkimuksen resonanssien määrittämismenetelmä perustui spektrien visuaaliseen arviointiin. Se on jokseenkin epätarkka menetelmä eikä sen pohjalta voida tehdä kovin vahvoja johtopäätöksiä. On kuitenkin todennäköistä, että koehenkilöillä toisen osasävelen kohdalle syntynyt spektrin voimakkain energiapiikki vahvistui jossain määrin joko suoraan ensimmäisen resonanssin vaikutuksesta tai sen alapuolisen ääntöväylän taajuusriippuvaisen reaktanssin vaikutuksesta. Toisen osasävelen voimakkuuteen voi vaikuttaa myös äänihuulivärähtelyn synnyttämän ilmavirtapulssin muoto. Tätä vaikutusta pohditaan tarkemmin jäljempänä.

Vokaalilla [ʌ:] myös neljäs osasävel oli ajoittain voimakas koehenkilöiden spektreissä. Tämä oli havaittavissa silloin, kun toinen resonanssi liikkui sen tuntumassa. Tuloksista on vaikea tehdä johtopäätöstä siitä, kuinka merkitsevä äänen tuoton kannalta tämä resonanssin virittyminen oli. Se saattoi tarjota laulajille tarvittavaa lisävahvistusta spektriin tai olla sattumanvarainen vaikutus, joka syntyi joillain sävelillä laulajan avatessa suutaan enemmän nostaakseen ensimmäisen resonanssin taajuutta. Jotta R2 nousisi merkittävästi suun avaamisen yhteydessä, on kielen muodostettava ääntöväylään jonkin asteinen kaventuma (Stevens & House, 1955; Lindblom & Sundberg, 1971). Muutoin suun avaamisen vaikutus nostaa lähinnä R1:n taajuutta. Jos laulaja pyrkii tarkoituksella nostamaan R2:ta neljännen osasävelen mukana, tämä onnistuu parhaiten säätämällä kielen ja kitaleen väliin jäävää kaventumaa sopivalle etäisyydelle huulista. Sekä Stevens ja House (1955) että

Lindblom ja Sundberg (1971) ovat raportoineet R2:n nousevan merkittävimmin kun kielen ääntöväylään muodostama kaventuma liikkuu kohti huulia. Kuvion 1 vokaalikartasta on lisäksi nähtävissä, että R2:n nousu muuttaa vokaalisävyä kohti äänteitä [æ:] ja [ɛ:]. Tutkijan oman kuulohavainnon perusteella varsinkin rekisterirajan yläpuolisilla sävelillä koehenkilöillä 1, 2 ja 3 oli kuultavissa vokaalisävyä muuntumista kyseisten äänteiden suuntaan. Heillä resonanssitajuuksien visuaalisen arvioinnin perusteella R2 seurasi H4:n taajuutta selvemmin kuin koehenkilöllä 4.

Koehenkilöltä 4 löydettiin rekisterirajan yläpuolelta joistain näytteistä verrattain voimakas kolmas osasävel. Voi olla mahdollista, että ensimmäinen ja toinen resonanssi siirtyivät hieman lähemmäksi toisiaan vahvistamaan yhdessä suurempaa taajuusaluetta, jonka kohdalle osui toisen osasävelen lisäksi myös kolmas osasävel. Tämän kaltainen resonanssitaktiikka muistuttaisi Bestebreurtjen ja Schutten (2000) vokaalille [ʌ:] ehdottamaa resonanssitaktiikkaa. Toinen vaihtoehto on, että ensimmäisen resonanssin kaistanleveys olisi kasvanut. Tarkasteltaessa kuitenkin koehenkilön 4 spektreissä näkyvää hälyä nähdään, että korkeimmilla sävelillä hänellä ei ole yhtä selkeää erillistä R2:ta kuin matalammilla sävelillä tai muilla koehenkilöillä. R1:n ja R2:n läheneminen voisi teoriassa vahvistaa näiden molempien resonanssien vaikutusta (Fant, 1970, 58) ja näin ollen tehostaa äänentuottoa. Koehenkilön 4 ja muiden koehenkilöiden välinen ero R2:n taajuudessa voisi selittyä kielen asennolla. Kun kielen ja kitalaen välillä on suuta avattaessa riittävästi etäisyyttä, R1 nousee ylöspäin ja lähemmäksi suurin piirtein samalla taajuudella pysyttelevää R2:ta (Stevens & House, 1955; Lindblom & Sundberg, 1971).

Tulosten perusteella vaikuttaa siltä, että rekisterirajan yläpuolella vokaalilla [ʌ:] ei-klassiselle laulajalle todennäköisin resonanssitaktiikka on vahvistaa toista osasäveltä tuomalla R1 sen läheisyyteen. R2:n virittymisellä neljännen tai viidennen osasävelen tuntumaan voi myös olla positiivista vaikutusta syntyvän äänen spektriin. Kenelläkään koehenkilöistä ei esiintynyt suoraan klassiselle laululle ominaisempaa tilannetta, jossa ensimmäinen resonanssi laskeutuu toisen osasävelen alapuolelle ja toinen resonanssi siirtyy vahvistamaan kolmatta osasäveltä.

5.1.2 Vokaali [ɛ:]

Vokaalille [ɛ:] muodostettiin hypoteesit, joiden mukaan mahdollisia resonanssitaktiikoita voisivat olla ensimmäisen resonanssin virittyminen toisen osasävelen tuntumaan sekä toisen resonanssin virittyminen viidennen osasävelen tuntumaan. Näistä ensimmäinen muodostettiin Bestebreutjen ja Schutten (2000) tutkimuksen tulosten pohjalta ja jälkimmäinen Bournen ja Garnierin (2010) tulosten pohjalta. Ensin mainitussa tutkimuksessa koehenkilönä toimi naispuolinen blueslaulaja ja jälkimmäisenä mainitussa kuusi naispuolista musiikkiteatterilaulajaa. Vokaalilla [ɛ:] toisen

resonanssin luonnollinen puheelle ominainen taajuus mahdollistaisi myös toisen resonanssin virittymisen neljännen osasävelen tuntumaan.

Tuloksista oli erittäin selvästi nähtävissä ensimmäisen resonanssin virittyminen toisen osasävelen tuntumaan. Toisin kuin vokaalilla [Λ:] kahdella koehenkilöistä resonanssin arvioitiin olevan täysin samalla taajuudella osasävelen kanssa useilla eri sävelillä. Ensimmäisen resonanssin viritys näkyi myös osasävelten välisissä voimakkuuksissa. Toinen osasävel oli kaikilla laulajilla spektrin selvästi voimakkain osasävel ollen pääasiassa 15 dB – 25 dB ensimmäistä osasäveltä voimakkaampi. Mahdollisena pidettyä toisen resonanssin virittymistä neljänteen tai viidenteen osasäveleen ei ollut havaittavissa. Toinen resonanssi näytti pysyttelevän lähellä normaalia puheelle ominaista taajuutta.

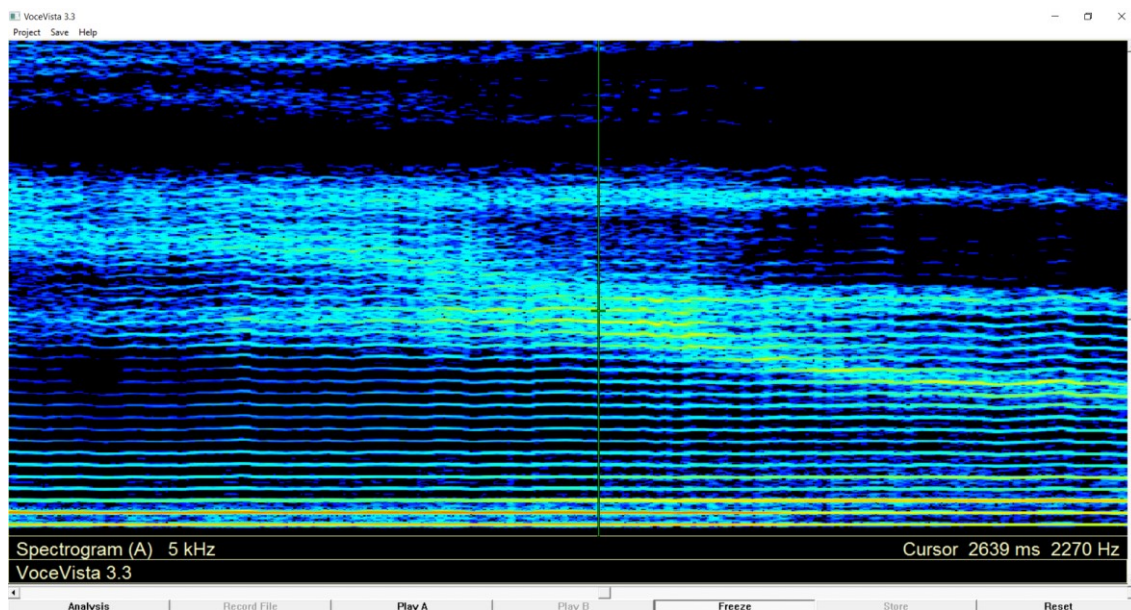
Vokaalilla [ε:] esiintynyt R1:n virittyminen H2:n tuntumaan voisi olla saavutettavissa avaamalla suuta enemmän sävelkorkeuden noustessa. [ε:]-vokaali on kielen sijainnin suhteen puoliväljä, joten suun avaamisella saattaa olla vaikutusta teoriassa myös R2:n taajuuteen. Tämä johtuu siitä, että suuta avattaessa R2:n taajuus kasvaa voimakkaimmin juuri silloin, kun kielen ääntöväylään muodostama kaventuma on lähellä pehmeää kitalakea (Lindblom & Sundberg, 1971). Laulaja voi näin ollen joutua suuta avatessaan hienosäätämään kielen sijaintia säilyttääkseen [ε:]-vokaalin sävyn. Tällainen säätäminen olisi todennäköisesti hyvin automaattista ja tiedostamatonta toimintaa kokeneella laulajalla.

Sekä [Λ:]- että [ε:]-vokaalilla rekisterirajan yläpuolella keskeinen piirre oli toisen osasävelen hallitsevuus spektrissä. Mielenkiintoinen pohtimisen arvoinen kysymys onkin, mikä on näiden kahden vokaalin välinen ero? [Λ:]-vokaalin äännössä ensimmäisen resonanssin lisäksi myös toisen resonanssin taajuus muuttui sävelkorkeuden noustessa kun taas [ε]-vokaalilla toinen resonanssi pysytteli lähempänä puheen taajuutta. Lisäksi toisen osasävelen ja sitä seuraavaksi voimakkaimman osasävelen voimakkuusero oli suurempi [ε]-vokaalilla kuin [Λ:]-vokaalilla. Ratkaiseva ero [Λ:]:n ja [ε]:n välillä saattaakin liittyä juuri näihin havaintoihin. Jos laulaja pyrkii ääntämään vokaalilla [ε:] hyödyntäen runsaasti resonanssi-ilmiötä, paras keino voi olla vahvistaa huomattavasti toista osasäveltä ensimmäisellä resonanssilla. Toisen resonanssin on tällöin kuitenkin pysyteltävä jossain määrin puheelle ominaista taajuusalueella. Jos sen taajuus laskisi liian alas vahvistamaan neljättä tai viidettä osasäveltä, syntyvä vokaali saattaisi alkaa muistuttaa vokaalia [Λ:], jonka kohdalla on mahdollista hyödyntää myös kolmannen ja neljännen osasävelen voimistamista.

5.1.3 Vokaali [i:]

Vokaalin [i:] kohdalla arvioitiin, että ensimmäinen resonanssi ei virittyisi minkään osasävelen tuntumaan, vaan todennäköisemmin pyrki välttämään ensimmäisen osasävelen taajuutta. Tämän on aiemmin havainnut tapahtuvan Bestebreutje ja Schutte (2000) tutkimuksessa, jossa koehenkilönä toimi yksi naispuolinen blues-laulaja. Myös Titze ym. (1994) arvioivat, että ensimmäisen resonanssin ja ensimmäisen osasävelen osuminen samalle taajuudelle olisi todennäköisesti klassiselle naisäänelle tyypillisempi asetus. Tämän tutkimuksen tulokset vahvistavat aiemmissa tutkimuksissa tehtyjä havaintoja. Ensimmäinen resonanssi pysytteli kaikilla koehenkilöillä ja sävelkorkeuksilla ensimmäisen osasävelen ja puheelle tyypillisen taajuutensa yläpuolella. Yhtenä mahdollisen tilanteena pidettiin hypoteeseja muodostettaessa, että toinen resonanssi virittyisi jonkin korkeamman osasävelen tuntumaan. Näin ei kuitenkaan resonanssien visuaalisen arvioinnin perusteella tapahtunut. Toinen resonanssi ei osunut minkään osasävelen kohdalle lukuun ottamatta viittä näytettä 44:stä /i/-vokaalilla laulettuista näytteistä.

Spektrien perusteella arvioitiin myös, että /i/-vokaalilla kolmannen resonanssin taajuudella voisi olla vaikutusta tehokkaimman resonanssitaktiikan saavuttamisessa. Teoriassa toisiaan lähellä olevien resonanssien huiput voimistuvat 6 dB ja niiden väliin jäävä alue 12 dB, jos resonanssien etäisyys puolittuu (Fant, 1970, 58). Näin ollen [i:]tä äännettäessä voisi olla mahdollista vahvistaa tehokkaammin spektrin korkeita osasäveliä laskemalla R3 lähemmäksi R2:n taajuutta. R3:n laskeutuminen oli käytännössä mahdollista toteuttaa viemällä kielen ääntöväylään muodostamaa kaventumaa suun etuosasta aavistuksen taakse päin kohti pehmeää kitalakea. Laskennallisten mallien perusteella suun ollessa riittävästi auki tai hymyasetuksessa kaventuman liikkuminen kohti kurkkua laskee ensin R3:n taajuutta, jonka jälkeen alkaa nostaa sitä (Lindblom & Sundberg, 1971). Tämä on helppo havainnollistaa spektrogrammilla ja puhekorkeudelta tapahtuvalla äännöllä. Kuviossa 35 on tutkijan itsensä /i/-vokaalilla tuottama ääntö. Äännön aikana kielen muodostama kaventuma liikkui hiljalleen kohti pehmeää kitalakea. Kuvioista näkyy miten R3 laskeutuu R2:n tuntumaan ja päättyy lähes samalle taajuudelle sen kanssa vihreän kursorin kohdalla.



KUVIO 35. Spektrogrammi vokaalin [i:] äännöstä. Kielen ääntöväylään muodostama kaventuma liikkuu taaksepäin kohti pehmeää kitalakea. Vihreän kursorin kohdalla R2 ja R3 kohtaavat.

Vokaalin [i:] spektreissä ei ollut yhtä voimakkaita resonanssien aiheuttamia korostumia kuin vokaaleilla [ʌ:] ja [e:], mikä näkyi kaikilla koehenkilöillä [i:]llä tuotettujen näytteiden matalampina kokonaisäänepainetasoina. Vokaalin [i:] äänenpainetasoon vaikutti todennäköisesti myös R1:n matala taajuus. Fantin (1970) akustisen teorian mukaan SPL kasvaa sitä mukaan mitä korkeammalla R1 sijaitsee. Tämä johtuu ainakin osaksi siitä, että resonanssitaajuudet toimivat ikään kuin alipäästösuotimina. Näin ollen äänteellä, jonka R1 on matalalla ja kaukana R2:sta, on pienempi äänenpainetaso kuin äänteellä, jonka R1 on korkealla ja lähellä R2:ta. (Fant, 1970, 48 - 58).

Tulokset antavat viitteitä siitä, että [i:]-vokaalilla laulajilla ei olisi välttämättä käytössään yhtä tehokkaita resonanssitaktiikoita kuin avoimemmilla vokaaleilla. Kyseisellä vokaalilla laulajan onkin todennäköisesti tuotettava ääneensä energiaa runsaammin jollain muulla keinolla kuin resonanssin avulla. EGG-mittaukset eivät antaneet selviä viitteitä äänilähteen erilaisesta toiminnasta. Subglottaalisen paineen lisääminen ja täten äänihuulten saattaminen värähtelemään laajemmin voisi olla yksi tapa lisätä energiaa. Myös ensimmäisen resonanssin pitäminen ensimmäisen osasävelen yläpuolella saattaa tehostaa äänilähteen toimintaa ääntöväylän taajuusriippuvaisen reaktanssin vaikutuksella, vaikka asetus ei olisikaan lineaarisen lähde-suodin teorian mukaan paras akustisen tehon maksimoimiseen. Titzen (2008) mukaan positiivisen reaktanssin vaikutuksesta äänihuulten välinen paine on ääniraon avautuessa suurempi kuin ääniraon sulkeutuessa. Sulkeutumisvaiheessa pienempi paine ikään kuin vetää äänihuulia yhteen, kun taas avautumisvaiheessa suurempi paine

työntää niitä erilleen. Positiivinen reaktanssi kallistaa myös äänihuulivärähtelyn synnyttämää ilmavirtapulssia oikealle, mikä saa aikaan voimakkaamman yläsävelsarjan. (Titze 2008)

5.1.4 Muita spektriin vaikuttavia tekijöitä

Tutkimuksessa keskityttiin arvioimaan kahden matalimman resonanssin taajuutta suhteessa näitä lähimpänä oleviin osasäveliin. Tässä luvussa pohditaan muita spektrin muotoon vaikuttavia tekijöitä, joita tutkimusasetelmassa ei pystytty ottamaan täysin huomioon. Doval, D'Alessandro, ja Henrich (2006) arvioivat glottaalista ilmavirtapulssia kuvastavien mallien (mallit: KLGLOTT88, Rosenberg C, R++ ja LF) perusteella, että äänilähteen tuottaman spektrin varsinkin matalimpiin osasäveliin vaikuttavat äänihuulivärähtelyn kontaktiaste sekä värähtelyn synnyttämän ilmavirtapulssin taipuminen oikealle (speed quotient = värähtelyn avautumisvaiheen ja sulkeutumisvaiheen suhde). Äänilähteen spektrissä näkyvän korostuman (ns. glottaalinen formantti) taajuus kasvaa, kun kontaktiaste kasvaa. Sen kaistanleveys puolestaan laajenee, kun värähtelyn tuottama ilmavirtapulssi kallistuu oikealle. Kyseinen korostuma voi sijaita suurin piirtein ensimmäisen ja neljännen osasävelen välillä. (Doval ym. 2006) Äänilähteen spektrissä tiiviissä tai puristeisessa äännössä H2 voi olla näin ollen jo valmiiksi voimakkaampi kuin H1 mistä seuraa se, että suusta ulos säteilevän äänen spektrissä osasävelten väliset erot eivät välttämättä ole yksinomaan resonanssien vaikutuksesta syntyneitä. Mallinnuksen ja käänteissuodatuksen perusteella tiiviissä äännössä (CQ on n. 0,60) äänilähteen spektrissä H2 saattaa olla noin 5 – 10 dB voimakkaampi kuin H1 (Fant 1995; Henrich ym. 2001; Doval ym. 2006). Myös tämän tutkimuksen koehenkilöillä voimakkaan toisen osasävelen syntymiseen vokaaleilla [ʌ:] ja [ɛ:] vaikutti resonanssin lisäksi todennäköisesti se, että kaikilla laulajilla äänirako oli pääasiassa vähintään 60 % värähtelyn periodista suljettuna. Tämä ei kuitenkaan sulje pois resonanssitaktiikoiden merkitystä koehenkilöiden äännöissä. R1:n taajuuden kasvu sävelkorkeuden ja H2:n taajuuden noustessa antoi viitteitä siitä, että kyseisen resonanssin ja H2:n suhteella olisi ollut koehenkilöiden äänentuotossa merkitystä. Lisäksi laulajilta mitatut H1:n ja H2:n väliset voimakkuuserot olivat rekisterirajan yläpuolella varsin huomattavia eikä pelkkä äänihuulivärähtelyn suuri CQ-arvo pysty niitä yksin selittämään. H2 oli keskimäärin 17 desibeliä H1:tä voimakkaampi vokaaleilla [ʌ:] ja [ɛ:] sävelvälillä G4 – A#4. Keskihajonta oli 5,3 ja minimi ja maksimi 27 ja 8.

Myös resonanssien kaistanleveyksillä on vaikutusta siihen kuinka paljon resonanssin läheisyyteen osuva osasävel on viereisiään osasäveliä voimakkaampi. Suuremman kaistanleveyden omaava resonanssi vahvistaa äänen spektristä suurempaa sävelaluetta, mutta vahvistus ei ole yhtä voimakas kuin kaistanleveyden ollessa kapeampi. Titzen (2000) mukaan ääntöväylän resonanssien

kaistanleveyksiin vaikuttaa ääntöväylässä tapahtuva energian häviäminen. Mitä suurempi energiahäviö on, sitä laajempia resonanssien kaistanleveydet ovat. Energiaa häviää, koska ääntöväylässä äänen heijastuminen ei tapahdu ikinä täydellisesti vaan osa energiasta poistuu ulos suusta tai ääniraon kautta keuhkoihin, imeytyy pehmeisiin värähteleviin kudoksiin tai ääntöväylän sisältämään ilmapatsaaseen kitkan muodossa. (Titze, 2000) House ja Stevens (1958) sekä Hanson (1997) havaitsivat, että äänihuulivärähtelyn kontaktiaste vaikuttaa varsinkin ensimmäisen resonanssin kaistanleveyteen. Mitä kauemmin äänihuulet ovat äänihuulivärähtelyssä yhdessä, sitä kapeammalta taajuusalueelta resonanssi vahvistaa osasäveliä äänen spektristä (House & Stevens, 1958; Hanson, 1997). Gill ym. (2015) raportoivat, että myös nenäportin avoimuudella on vaikutusta. Heidän mukaansa nenäportin ollessa auki kaistanleveydet ovat suurempia kuin nenäportin ollessa kiinni. Gil ym. arvioivat myös, että laulajat voisivat vähentää lähteen ja suotimen välisiä negatiivisia epälineaarisia vuorovaikutuksia avaamalla nenäporttia ja kasvattamalla sopivassa suhteessa resonanssien kaistanleveyksiä (Gill ym. 2015). Titzen (2008) mukaan lähteen ja suotimen väliset epälineaariset vuorovaikutukset vaikuttavat äänihuulivärähtelyyn negatiivisesti silloin, kun jokin ääntöväylän resonanssi osuu suoraan perustaajuuden tai jonkin matalimman osasävelen kohdalle. Resonanssien kaistanleveyksillä on todennäköisesti ollut vaikutusta myös tämän tutkimuksen tuloksiin. Tutkimus keskittyi kuitenkin pääasiassa selvittämään, miten laulajat muuttavat resonanssien taajuuksia suhteessa osasäveliін sävelkorkeuden noustessa eikä siihen kuinka suuria voimakkuuseroja osasävelten välillä on. Näin ollen resonanssien kaistanleveyksillä ei katsottu olevan suurta merkitystä tämän tutkimuksen tulosten arvioinnissa.

5.2 Resonanssi ja äänilähde

Resonanssin ja äänilähteen välistä vuorovaikutusta tutkittiin vertaamalla kahden matalimman resonanssin ja niitä lähimpänä olevien osasävelten etäisyyksiä elektroglossografialla mitattuihin äänihuulikontaktia kuvaaviin parametreihin. Resonanssien ja osasävelten välistä etäisyyttä kuvasi kolme muuttujaa, jotka olivat ensimmäisen resonanssin ja sitä lähimpänä olevan osasävelen etäisyys (**R1 viritys**), toisen resonanssin ja sitä lähimpänä olevan osasävelen etäisyys (**R2 viritys**) ja näiden kahden keskiarvo (**R1-R2 viritys**). Äänihuulikontaktia kuvaavat EGG-signaalista lasketut muuttujat olivat kontaktiosamäärä (CQ), amplitudi-normalisoidun signaalin ensimmäisen derivaatan maksimi (MDEGG), signaalin amplitudin maksimi (PTP amplitudi) ja normalisoitu amplitudiosamäärä (NAQ). Analyysissä oli mukana rekisterirajan yläpuoliset sävelet (G4, G#4, A4 ja A#4).

Kun kaikille koehenkilöille laskettiin yhteiskorrelaatio, löydettiin positiivinen ja merkitsevä korrelaatio (Spearman's rho 0,434) molempien resonanssien yhteisvirityksen (**R1-R2 viritys**) ja

suljetun osamäärän (CQ) välillä. Myös **R1-R2 virityksen** ja MDEGG:n väliltä löytyi merkitsevä negatiivinen korrelaatio (Spearman's rho -0,341). Kun koehenkilöitä tarkasteltiin yksittäin, ei vastaavia korrelaatiota ollut havaittavissa. Toisin sanoen kenelläkään koehenkilöistä EGG-parametrit eivät reagoineet siihen, kuinka lähelle osasäveliä resonanssit oli viritetty, mutta koehenkilöt, jotka virittivät resonanssinsa keskimäärin tarkemmin, lauloivat keskimäärin pienemmällä kontaktiosamäärällä. Sama päti kääntäen MDEGG:n ja **R1-R2 virityksen** välillä.

Sekä CQ:n ja **R1-R2 virityksen** välinen korrelaatio että MDEGG:n ja **R1-R2 virityksen** välinen negatiivinen korrelaatio saattavat olla seurausta vähäisestä koehenkilömäärästä. Näin ollen tämän kertaiset tulokset lähinnä rohkaisevat tekemään tulevaisuudessa lisätutkimusta suuremmalla koehenkilömäärällä. Havaittuihin korrelaatioihin voi kuitenkin olla myös muita syitä. Ensiksi, jos laulaja ei kykene tuottamaan pitkää äänihuulivärähtelyn sulkuvaihetta, hän voisi mahdollisesti korvata tätä ominaisuutta virittämällä resonanssinsa lähemmäksi osasäveliä ainakin joillain vokaaleilla. Toiseksi, jos laulaja pystyy tuottamaan ääneensä runsaasti energiaa pitämällä äänihuulet tiiviisti yhdessä äännön aikana, hän voi olla tottunut käyttämään resonanssien viritystä vain niukasti avukseen. Kolmanneksi, jos laulaja on oppinut käyttämään resonanssia tehokkaasti hyödykseen, hän voisi pärjätä väljemmällä äänihuulten välisellä adduktiolla ja olla näin ollen tottunut käyttämään tällaista asetusta. MDEGG:n ja resonanssien virityksen välistä negatiivista korrelaatiota on hankalampi selittää. MDEGG kuvastaa sitä kuinka nopeasti äänihuulten välinen kontakti kasvaa. Näin ollen voisi ajatella, että resonanssien ja osasävelten etäisyyksien muutokset saattaisivat aiheuttaa muutoksia äänihuulten yläpuolisessa paineessa ja vaikuttaa tätä kautta myös äänihuulten sulkeutumisenopeuteen. Tällöin kuitenkin MDEGG:ssä tapahtuvien muutosten tulisi näkyä myös koehenkilökohtaisissa analyyseissä. Tätä ei tuloksista ollut havaittavissa. MDEGG:n ja resonanssien virityksen välinen korrelaatio saattaisi selittyä osaksi CQ:n ja MDEGG:n välisenä korrelaationa, mutta tällöin molempien korrelaatiot resonanssien virityksen kanssa olisivat todennäköisesti samansuuntaiset.

Rothenberg (1988) tutki resonanssin vaikutusta äänihuulivärähtelyyn, jota arvioitiin EGG:n avulla. Hän havaitsi, että kun sopraanolaulajalla ensimmäistä resonanssia siirrettiin äännön aikana yllättäen kauemmaksi perustaajuudesta, EGG-signaalin amplitudi pieneni ja pulssin muoto muuttui kapeammaksi. EGG-signaalin pulssin kaventuessa äänihuulten välisen kontaktin kesto värähtelyssä todennäköisesti pienenee samoin kuin signaalista laskettava CQ:n arvo. Näin ollen Rothenbergin saamat tulokset ovat osaltaan ristiriidassa tämän tutkimuksen tulosten kanssa. Näiden tutkimusten tulokset eivät ole kuitenkaan suoraan keskenään verrannollisia sillä koehenkilöt edustivat eri sukupuolta ja musiikintyyliä. Lisäksi Rothenbergin menetelmä perustui siihen, että olosuhteet resonanssissa muuttuivat äkillisesti ilman, että koehenkilöt pystyivät hallitsemaan niitä.

Pohdittaessa EEG-parametrien ja resonanssien virityksen välistä yhteyttä on syytä tuoda vielä esiin CQ:n ja perustaajuuden välinen korrelaatio. Sen vaikutusta pyrittiin poissulkemaan pienentämällä analyysiin mukaan otettua sävelväliä. Tästä huolimatta analyysissä havaittiin CQ:n ja perustaajuuden välinen merkitsevä korrelaatio (Spearman's rho 0,413). Resonanssien viritys ei kuitenkaan korreloinut perustaajuuden kanssa lukuun ottamatta koehenkilöä 1, jolla löytyi melkein merkitsevä korrelaatio p:n arvolla 0,054 (Pearson r 0,461). Tämä lisää todennäköisyyttä sille, että resonanssien virityksen ja CQ:n välinen korrelaatio ei syntynyt pelkästään sävelkorkeuden muutoksen vaikutuksesta. MDEGG:n ja SPL:n välillä on myös havaittu korrelaatiota aiemmissa tutkimuksissa. Kankare, Liu, Laukkanen ja Geneid (2013) havaitsivat näiden korreloivan puheessa naispuolisilla lastentarhan opettajilla positiivisesti ja merkitsevästi ($r = 0,317$) painollisella vokaalilla [a:]. Positiivisen melkein merkitsevän korrelaation ($r = 0,48$) löysivät myös Ikävalko, Horáček, Liu ja Laukkanen (2015) yhdellä miespuolisella pop/Jazz-laulajalla. Mahdollinen SPL:n ja resonanssien virityksen välinen korrelaatio voisi periaatteessa selittää MDEGG:n ja resonanssien virityksen välistä korrelaatiota. Tässä tutkimuksessa SPL ja resonanssien viritys eivät kuitenkaan korreloineet. SPL ja MDEGG korreloivatkin negatiivisesti ja merkitsevästi (Spearman's rho = -0,448) päinvastoin kuin aiemmissa tutkimuksissa. Kyseisestä korrelaatiosta ei voi tehdä suuria johtopäätöksiä, koska sitä ei esiintynyt koehenkilöillä erikseen vaan ainoastaan kaikkien koehenkilöiden yhteisanalyysissä. Toisin sanoen koehenkilöillä, joilla oli keskimäärin matala MDEGG:n arvo, oli vastaavasti keskimäärin suurempi SPL.

5.3 Tutkimuksen yleinen arviointi

Tutkimuksen suurimmat epätarkkuus- ja virhetekijä syntyivät todennäköisesti resonanssitaajuuksien määrittämisessä käytetyn menetelmän johdosta. On selvää, että resonanssien määrittäminen etenkin korkeilla sävelillä spektristä on epätarkkaa. Paras tapa todennäköisesti olisi ollut Henrichin ym. (2011) käyttämä menetelmä, jossa huulten kohdalta suuhun syötetään äännön aikana akustisena herätteenä toimivaa kohinaa. Henrich ym. raportoivat menetelmän virhemarginaaliksi ainoastaan plusmiinus 11 Hz. Tämän tutkimuksen laajuuden huomioiden sopivaksi menetelmäksi katsottiin kuitenkin resonanssien arvioiminen spektrikuvassa näkyvästä epäperiodisesta hälystä. Samaa menetelmää on aiemmin käyttänyt pedagogisena apuvälineenä Miller (2008). Menetelmävalinnan perusteena toimi lisäksi sen hyvä soveltuvuus kannettavalla mittalaitteistolla tehtäviin mittauksiin. Kiireisiä ammattilaulajia nauhoitettaessa laitteiston yksinkertaisuus on suureksi hyödyksi. Menetelmän tarkkuutta pyrittiin lisäämään käyttämällä kahta arvioijaa, minkä ansiosta menetelmän virhemarginaalia pystyttiin myös paremmin arvioimaan. Ne spektrit, jotka arvioijat arvioivat

toisistaan huomattavan poikkeavasti, muodostettiin Praatilla vielä uudelleen käyttäen suurempaa aikaikkunaa. Näin arvioita saatiin huomattavasti yhdenmukaistettua samalla kun spektrien tulkittavuus parani.

Tutkimuksen tulosten yleistettävyyteen vaikuttaa koehenkilöiden lukumäärä. Tutkittavana oli suhteellisen pieni koehenkilömäärä. Neljästä koehenkilöstä lisäksi yhdellä (koehenkilö 2) ilmeni tallennetuissa näytteissä häiriötä, jotka olivat akustisen signaalin jonkin asteinen yliohjautuneisuus ja EGG-signaalissa havaittu kohtuullinen kohina. Mitatun EGG-signaalin arvioitiin olevan riittävän hyvälaatuinen ainakin kohtuullisen todenmukaisten CQ:n arvojen laskemiseksi. Akustisen signaalin lievän säröytymisen vaikutusta pyrittiin vähentämään niin, että analysoitava kohta vokaalinäytteestä valittiin signaalin sellaisesta kohdasta, jossa ei ollut havaittavissa ollenkaan tai vain mahdollisimman vähän yliohjautuneisuutta. Yliohjautumisen vaikutusta spektriin pyrittiin lisäksi arvioimaan tallentamalla yksi koehenkilön 4 ääninäytteistä MOTU-äänikortin kautta 10 kertaa uudelleen siten, että signaali ylitti laitteen maksimi signaalitason 0 – 10 dB:llä. Kokeen perusteella yliohjautumisen vaikutukset näkyivät spektrikuvaajissa voimakkaimmin kuudennen osasävelen yläpuolella olevien osasävelten muuttuneissa voimakkuuksissa. Yliohjautuminen tasoitti myös jonkin verran spektrien hälyssä näkyviä korostumia, minkä arvioitiin hankaloittaneen jonkin verran resonanssien taajuuksien arviointia.

Laitteissa esiintyneiden häiriöiden lisäksi kaksi koehenkilöä ilmoitti, etteivät olleet täysin normaalissa laulukunnossa. Toinen koehenkilöistä (koehenkilö 2) oli toipumassa yskästä ja toinen (koehenkilö 3) flunssasta. Koehenkilöiltä nauhoitettu data katsottiin kuitenkin kaiken kaikkiaan määrällisesti ja laadullisesti riittäväksi tutkimuksen tavoitteiden täyttämiseen, sillä pyrkimyksenä ei ollut tuottaa varsinaisia yleisiä malleja ei-klassisten laulajien resonanssitaktikoille. Aiemman kirjallisuuden perusteella oli tiedossa, että laulajilla on todennäköisesti useita mahdollisuuksia toimia silloin, kun aikomuksena on hyödyntää runsaasti resonanssia äänentuotossa. Tutkimus onnistui osin vahvistamaan aiempia oletuksia ja tuomaan jossain määrin myös uutta tietoa ei-klassisten mieslaulajien resonanssitaktikoista, joita on tutkittu aiemmin vähemmän.

Tärkeä kysymys tutkimuksen laatua arvioitaessa on myös koehenkilöiden antamien näytteiden toistettavuus. Ääntötehtävässä 4 koehenkilöitä pyydettiin laulamaan jokaisen kolmen tutkitun vokaalin sisältänyt sana erikseen kahdelta eri säveleltä. Näytteitä verrattiin ääntötehtävän 3 vastaavilla sävelillä ja vokaaleilla tuotettuihin näytteisiin. Tällä tavalla pyrittiin tuottamaan tietoa siitä onko resonanssitaktikka laulajalla identtinen aina saman vokaalin ja sävelkorkeuden kohdalla. Tuloksista näkyi, että näytteiden välillä oli eroja. Suurimmat erot olivat koehenkilön 4 näytteissä. Havaitut erot eivät kuitenkaan välttämättä vaikuta havaittujen resonanssitaktiikoiden paikkansapitävyyteen. Resonanssitaktikoihin ja resonanssien taajuuksiin liittyvät tulokset

osoittivat, että varsin harvoin resonanssitaktiikkaan liittyi resonanssin tarkka virittäminen. Vain vokaalilla [ε:] R1 sijoittui hetkittäin suoraan H2:n kanssa samalle taajuudelle. Tämä sama piirre oli nähtävissä sekä ääntötehtävässä 3 että 4 pois lukien koehenkilön 4 sävelellä G#4 laulaman näytteen ääntötehtävässä 4. Siinä R1:n arvioitiin sijoittuvan toisen osasävelen (n. 830 Hz) alapuolelle suurin piirtein taajuudelle 692 Hz.

Laulajien tavat hyödyntää resonanssia laulussa on kiinnostava aihe, jota on hyödyllistä tutkia vielä jatkossakin. Tähän mennessä tutkimuksen avulla on saatu selville yleisiä tapoja, joita eri tyylien laulajien on mahdollista käyttää hyödykseen. Sitä, miksi resonanssitaktikat ovat erilaisia klassisessa laulussa ja ei-klassisessa laulussa, on vielä syytä pohtia. Erot selittyvät todennäköisesti useilla tekijöillä. Esimerkiksi kuuluakseen suurenkin orkesterin ylitse klassinen laulu tarvitsee erilailla painottuneen yläsävelsarjan kuin äänentoistolla yleensä voimistettu ei-klassinen laulu. Resonanssien sijainnit vaikuttavat myös huomattavasti äänensävyyn. Siihen, minkälainen äänensävy on koettu esteettisesti miellyttäväksi kummassakin laulutyyliässä, on saattanut puolestaan vaikuttaa erot soitinkokoonpanojen äänenväreissä. Samanlainen ilmiö on havaittavissa myös ei-klassisten tyyliä laulajien sisällä. Jazz-laulajat omaavat erilaisen äänenvärin ja laulutavan kuin rock-laulajat, mikä lienee selittyvän osaksi sillä, että jazzissa käytetään enimmäkseen akustisia soittimia kun taas rockissa sähköisiä. Myös musiikinlajin rytmisyydellä voi olla vaikutusta. Rytmimusiikissa kuten pop, rock, jazz ja soul on solistin kyettävä fraseerauksessaan tuomaan esiin musiikin rytminen luonne. Tämä vaatii ääntöelimistöltä ja varsinkin ääntöväylältä joustavuutta. Sen on kyettävä nopeasti vaihtamaan asentoa eri konsonanttien ja vokaalien välillä, jotta rytmin ilmaisu olisi riittävän tarkkaa. Klassisessa laulussa on taas tärkeämmässä roolissa äänensävy ja äänen kantavuus. Ääntöväylän muotoa voidaan siinä pitää kaiken kaikkiaan staattisempana kuin ei-klassisessa laulussa. Jatkossa olisi kiinnostavaa löytää juuri yleisimmistä resonanssitaktiikoista poikkeavia tapoja. Populaarimusiikin piirissä jollain tavalla erikoiset ja poikkeukselliset laulajat saatetaan usein kokea kuuntelijoiden puolelta kaikkein kiinnostavimpina. Osa niistä piirteistä, jotka saavat laulajan kuulostamaan erityiseltä, voivat liittyä juuri resonanssiin.

Tutkimus tarjosi mielenkiintoisen alustavan havainnon resonanssien virityksen ja elektroglossografialla mitattujen äänilähteen ominaisuuksien välisestä yhteydestä. Tämän havainnon perusta ei ole kovin vahva, koska koehenkilömäärä oli suppea ja resonanssien arviointiin käytetty menetelmä jokseenkin epätarkka. Tulokset rohkaisevat kuitenkin toteuttamaan tulevaisuudessa vastaavanlaisia kokeita suuremmalla koehenkilömäärällä ja käyttäen resonanssitaajuuksien määrittämiseen jotain tarkempaa menetelmää kuten esimerkiksi Henrichin ym. (2011) käyttämää suun ulkopuolelta ääntöväylään syötettävään akustista herätettä. Tulevaisuudessa voisi olla myös mielenkiintoista tutkia liittykö resonanssitaktiikoihin erityisiä ääntöväylän muotoon kytköksissä

olevia ominaisuuksia. Tätä voisi mahdollisesti tutkia käyttämällä tietokonetomografiaa tai magneettikuvausta. Koehenkilön olisi pystyttävä vaihtamaan asetusta kahden erilaisen resonanssitaktiikan välillä, mikä saattaa olla koulutetullekin laulajalle haaste. Jos resonanssitaktiikalla on havaittavissa selkeä yhteys jonkinlaiseen ääntöväylän muotoon, voidaan mallinnuksen avulla tutkia miten resonanssitaktiikka vaikuttaa ääntöväylän impedanssiin. Ääntöväylän taajuusriippuvaisella impedanssilla on vaikutusta äännössä sekä äänilähteen toimintaan että sen synnyttämän äänen spektrin muotoon (Titze, 2008). Synteesikokeilla olisi vielä mahdollista tutkia eri resonanssitaktiikoiden vaikutusta kuulohavaintoon.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä tutkimuksissa pyrittiin selvittämään minkälaisia resonanssitaktiikoita ei-klassisten musiikin tyyllilajien kuten pop, rock, soul ja heavy laulajilla on mahdollista hyödyntää. Tutkimus keskittyi miespuolisten laulajien rekisterirajan tuntumassa ja yläpuolella tapahtuvaan voimakkaaseen ja keskivoimakkaaseen lauluun. Tutkimus rajattiin kahteen väljään vokaaliin [ʌ:] ja [ɛ:] sekä yhteen suppeaan etiseen vokaaliin [i:]. Neljä koehenkilöä tuotti ääntötehtäviä laulaen englannin kielen sanoilla *love*, *let* ja *leave*. Äännoista tallennettiin akustinen signaali ja elektroglossografia.

Vokaaleilla [ʌ:] ja [ɛ:] tulokset antoivat viitteitä siitä, että rekisterirajan yläpuolella laulajan on mahdollista tehostaa ääntöään pitämällä ensimmäinen resonanssi toisen osasävelen lähellä sen yläpuolella tai vokaalin [ɛ:] tapauksessa sen yläpuolella tai kohdalla. Vokaalin [ʌ:] äännössä myös toinen resonanssi vaihtoi taajuuttaan joissain tapauksissa sävelkorkeuden noustessa, joten sen osittainen virittäminen saattaa olla äännölle hyödyksi. Koehenkilöt eivät näyttäneet säätävän toisen resonanssin taajuutta ääntäessään vokaalilla [ɛ:]. Vokaalilla [i:] oli sävelkorkeuden noustessa havaittavissa selvästi ensimmäisen resonanssin taajuuden kasvu, joka sai resonanssin pysymään koko ajan ensimmäisen osasävelen yläpuolella. Tämä löytö mukaili myös aiempien tutkimusten havaintoja. Vokaalilla [i:] saattaa myös kolmannella resonanssilla olla rooli tehokkaimman akustisen asetuksen saavuttamisissa. Laulajan voi olla mahdollista laskea tätä lähelle toista resonanssia ja näin ollen kasvattaa näiden molempien vaikutusta spektriin. Elektroglossografialla mitattujen parametrien ja resonanssien virityksen välillä havaittiin yhteys, joka näkyi koehenkilöiden välisessä vertailussa, mutta ei yksittäisten koehenkilöiden kohdalla.

Kiitokset:

Tutkija haluaa kiittää koehenkilöinä toimineita laulajia Ville Laaksosta, Kimmo Blomia, Aleksi Aromaata ja Antti Parankoa heidän kiinnostuksestaan ja panoksestaan tutkimusta kohtaan ja siitä, että he tekivät tilaa kiireisiin aikatauluihinsa mittausten suorittamista varten.

LÄHTEET

- Aldrich, N. (2004). *Digital Audio Explained For the Audio Engineer*. 2. painos. Fort Wayne Indiana: Sweetwater Sound.
- Baken, R. J. & Orlikoff, R. F. (2000). *Clinical Measurement of Speech and Voice*. 2. painos. San Diego: Singular Publishing Group.
- Bestebreurtje, M. E. & Schutte, H. K. (2000). Resonance strategies for the belting style: results of a single female subject study. *Journal of Voice* 14 (2), 194–204.
- Björkner, E. (2008). Musical theater and opera singing—why so different? A study of subglottal pressure, voice source, and formant frequency characteristics. *Journal of Voice* 22 (5), 533–540.
- Bourne, T. & Garnier, M. (2010). Physiological and acoustic characteristics of the female music theatre voice in 'belt' and 'legit' qualities. Teoksessa: *Proceedings of the International Symposium on Music Acoustics*. Katoomba: Australia. 25-31.8.2010. 9–13.
- Childers, D. G., Hicks, D. M., Moore, G. P. & Alsaka, Y. A. (1986). A model for vocal fold vibratory motion, contact area, and the electroglottogram. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 80 (5), 1309–1320.
- Childers, D. G., Hicks, D. M., Moore, G. P., Eskenazi, L. & Lalwani, A. L. (1990). Electroglottography and vocal fold physiology. *Journal of Speech and Hearing Research* 33, 245–254.
- Childers, D. G., Smith, A. M. & Moore, G. P. (1984). Relationships between electroglottograph, speech, and vocal cord contact. *Folia Phoniat.* 36, 105–118.
- Coffin, B. (1980). *Coffin's Overtones of Bel Canto*. Maryland: Scarecrow Press.
- Doval, B., D'Alessandro, C. & Henrich, N. (2006). The spectrum of glottal flow models. *Acta Acustica United with Acustica* 92 (6), 1026–1046.
- Eldhuis, R. N. & Yegnanarayana, B. (1998). Extraction of vocal tract system characteristics from speech signals. *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing* 6 (4), 313–327.
- Fant, G. (1970). *Acoustic Theory of Speech Production*. 2. painos. Haag: Mouton.
- Fant, G. (1995). The LF-model revisited. Transformations and frequency domain analysis. *STL-QPSR* 36 (2-3), 119–156.
- Gill, B. (2015). Round table on nasal resonance in singing. Teoksessa: C. Manfredi (toim.) *Pan European Voice Conference : Pevoc 11 Abstract Book*. 31.8-2.9.2015. Firenze. Firenze University Press, 2015. 154.
- Hanson, H. M. (1997). Glottal characteristics of female speakers: acoustic correlates. *The Journal of the Acoustical Society of America* 101 (1), 466–481.
- Henrich, N., Alessandro, C. & Doval, B. (2001). Spectral correlates of voice open quotient and glottal flow asymmetry : theory, limits and experimental data. Teoksessa: *Eurospeech 2001*, Aalborg, Tanska. 3-7.9.2001.
- Henrich, N., d'Alessandro, C., Doval, B. & Castellengo, M. (2004). On the use of the derivative of electroglottographic signals for characterization of nonpathological phonation. *The Journal of the Acoustical Society of America* 115 (3), 1321–1332.

- Henrich, N., Smith, J. & Wolfe, J. (2011). Vocal tract resonances in singing: strategies used by sopranos, altos, tenors, and baritones. *The Journal of the Acoustical Society of America* 129 (2),
- Herbst, C. T., Lohscheller, J., Švec, J. G., Henrich, N., Weissengruber, G. & Fitch, W. T. (2014). Glottal opening and closing events investigated by electroglottography and super-high-speed video recordings. *The Journal of Experimental Biology* 217, 955–63.
- Herbst, C. & Ternström, S. (2006). A comparison of different methods to measure the EGG contact quotient. *Logopedics Phoniatrics Vocology* 31 (3), 126–138.
- House, A. S. & Stevens, K. N. (1958). Estimation of formant band widths from measurements of transient response of the vocal tract. *Journal of Speech Hearing Disorders* 1 (4), 309–315.
- Iivonen, A. & Laukkanen, A.-M. (1993). Explanations for the qualitative variations of Finnish vowels. Teoksessa: A. Iivonen & M. Lehtihalmes (toim.) *Studies in Logopedics and Phonetics* 4, Publications of the Department of Phonetics, University of Helsinki, Series B: Phonetics, Logopedics and Speech Communication 5. Helsinki, Helsingin yliopisto. 29–54
- Ikävalko, T., Horáček, J., Liu, D. & Laukkanen, A.-M. (2015). Electroglottographic parameters in evaluation of voice quality. Acoustic analyses from a singer and aeroelastic modelling. Teoksessa: C. Manfredi (toim.) *Models and Analysis of Vocal Emissions for Biomedical Applications : 9 th international workshop*. 2-4.9.2015. Firenze. Firenze University Press, 2015. 45–48.
- Kankare, E., Liu, D., Laukkanen, A. M. & Geneid, A. (2013). EGG and acoustic analyses of different voice samples: Comparison between perceptual evaluation and voice activity and participation profile. *Folia Phoniatica et Logopaedica* 65 (2), 98–104.
- Laukkanen, A. M. & Leino, T. (1999). Ihmeellinen ihmisääni: äänenkäytön ja puhetekniikan perusteet, arviointi, mittaaminen ja kehittäminen. Helsinki: Gaudeamus.
- Lindblom, B. E. & Sundberg, J. E. (1971). Acoustical consequences of lip, tongue, jaw, and larynx movement. *The Journal of the Acoustical Society of America* 50 (4), 1166–1179.
- Miller, D. G. (2008). *Resonance in singing: voice bilding through acoustic feedback*. Princeton, NJ: Inside View.
- Miller, R. L. (1959). Nature of the vocal cord wave. *The Journal of the Acoustical Society of America* 31 (6), 667 – 677.
- Neumann, K., Schunda, P., Hoth, S. & Euler, H. A. (2005). The interplay between glottis and vocal tract during the male passaggio. *Folia Phoniatica et Logopaedica* 57, 308–327.
- Peterson, G. E. & Barney, H. L. (1952). Control methods used in a study of the vowels. *The Journal of the Acoustical Society of America* 24 (2), 175–184.
- Rothenberg, M. (1988). Acoustic reinforcement of vocal fold vibratory behavior in singing. Teoksessa O. Fujimura (toim.) *Vocal Physiology: Voice Production, Mechanisms and Functions*. New York: Raven Press, 379–389.
- Rothenberg, M. (1992). A multichannel electroglottograph. *Journal of Voice* 6 (1), 36–43.
- Rothenberg, M. & Mahshie, J. J. (1988). Monitoring vocal fold abduction through vocal fold contact area. *Journal of Speech and Hearing Research* 31 (3), 338–351.
- Sadolin, C. (2008). *Comlete vocal technique*. 2n. painos. Kööpenhamina: CVI Publications ApS.
- Schutte, H. K., Miller, D. G. & Duijnste, M. (2005). Resonance strategies revealed in recorded

tenor high notes. *Folia Phoniatica et Logopaedica* 57, 292–307.

Seikel, J., King, D. & Drumright, D. (2009). *Anatomy & Physiology for Speech, Language, and Hearing*. 3. painos. Clifton Park, NY: Thomson Delmar Learning.

Stevens, K. N. & House, A. S. (1955). Development of a quantitative description of vowel articulation*. *Journal of the Acoustical Society of America* 27 (3), 484–493.

Sundberg, J. (1977). The acoustics of the singing voice. *Scientific American* 236, 82 – 91.

Sundberg, J. (1987). *Science of the Singing Voice*. DeKalp, Illinois: Northern Illinois University Press.

Sundberg, J., Lã, F. M. B. & Gill, B. P. (2011). Professional male singers' formant tuning strategies for the vowel /a/. *Logopedics, Phoniatrics, Vocology* 36 (4), 156–67.

Sundberg, J., Lã, F. M. B. & Gill, B. P. (2013). Formant tuning strategies in professional male opera singers. *Journal of Voice* 27 (3), 278–88.

Titze, I. R. (2000). *Principles of voice production*. Iowa City: National Center for Voice and Speech.

Titze, I. R. (2008). Nonlinear source-filter coupling in phonation: theory. *The Journal of the Acoustical Society of America* 123 (5), 2733–49.

Titze, I. R. (2009). How are harmonics produced at the voice source? *Journal of Singing* 65 (5), 575–576.

Titze, I. R., Mapes, S. & Story, B. (1994). Acoustics of the tenor high voice. *The Journal of the Acoustical Society of America* 95 (2), 1133–1142.

Titze, I. R. & Worley, A. S. (2009). Modeling source-filter interaction in belting and high-pitched operatic male singing. *The Journal of the Acoustical Society of America* 126 (3), 1530–1540.

Verdolini, K., Chan, R., Titze, I. R., Hess, M. & Bierhals, W. (1998). Correspondence of electroglottographic closed quotient to vocal fold impact stress in excised canine larynges. *Journal of Voice* 12 (4), 415–423.